



Ressource et gestion intégrée des eaux karstiques de montagne : analyse des impacts du changement climatique et de l'anthropisation des bassins versants

Grégory Tissier

► To cite this version:

Grégory Tissier. Ressource et gestion intégrée des eaux karstiques de montagne : analyse des impacts du changement climatique et de l'anthropisation des bassins versants. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT : 2012GRENA030 . tel-00808614

HAL Id: tel-00808614

<https://theses.hal.science/tel-00808614>

Submitted on 5 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Hydrogéologie**

Arrêté ministériel : 07/08/2006

Présentée par

TISSIER Grégory

Thèse dirigée par **GASQUET Dominique**
et codirigée par **DZIKOWSKI Marc** et **HOBLEA Fabien**

préparée au sein du laboratoire **EDYTEM (Université de Savoie)**
et de l'Ecole Doctorale **SISEO**

Ressource en eaux karstiques de montagne : analyse des impacts de l'anthropisation dans un contexte de changement climatique

Thèse soutenue publiquement le **23/11/2012**,
devant le jury composé de :

Mr. Zwahlen François

Université de Neuchâtel, Rapporteur

Mr. Huneau Frédéric

Université de Corse Pascal-Paoli, Rapporteur

Mr. Jourde Hervé

Université de Montpellier 2, Examineur

Mr. Razack Moumtaz

Université de Poitiers, Examineur

Mr. Cadilhac Laurent

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse, Examineur

Mr. Gasquet Dominique

Université de Savoie, Directeur de thèse

Mr. Dzikowski Marc

Université de Savoie, Co-Directeur de thèse

Mr. Hobléa Fabien

Université de Savoie, Co-Directeur de thèse



Résumé

Les domaines subalpin et jurassien sont constitués de nombreux systèmes karstiques de dimension et de surface réduites qui peuvent représenter localement l'unique ressource des communes. Les bassins d'alimentation de ces systèmes sont essentiellement composés de forêts et de pâturages et ne présentent qu'une urbanisation limitée. Les systèmes karstiques sont des milieux de transferts rapides assez mal connus dans la région.

L'objectif principal de cette thèse s'attache à étudier les relations entre le fonctionnement et la vulnérabilité des systèmes karstiques de moyenne montagne. La vulnérabilité est abordée selon trois approches : intrinsèque, anthropique et climatique. Pour cela huit sites de nature différente et complémentaire (sources karstiques, galerie karstique et rivières) ont été étudiés.

La vulnérabilité intrinsèque est étudiée par l'application de la méthode PaPRIKa. Cette analyse se fonde sur la superposition par pondération de cartes des bassins d'alimentation réalisées en fonction des critères Roche, Infiltration, Protection et Karstification. Elle permet de spatialiser les degrés de vulnérabilité sur le bassin d'alimentation d'un système karstique. Bien que les systèmes étudiés présentent des fonctionnements hydrodynamiques et une occupation des sols relativement similaires, les degrés de vulnérabilité diffèrent en fonction des sites.

La vulnérabilité anthropique est étudiée, dans le cadre du programme Interreg Alpeau, sous l'angle de la remobilisation des sols suite à des travaux de sylviculture programmés sur les bassins d'alimentation. La recherche s'est concentrée sur la matière organique dissoute et en suspension et plus particulièrement sur la matière organique fluorescente. Ce travail a d'abord nécessité la réalisation d'un état des lieux sur les transferts associés au fonctionnement hydrodynamique des sites d'étude sur un cycle hydrologique. Pendant ou à la suite des travaux, les eaux des systèmes karstiques présentent des pics de turbidité ainsi que des venues en matières organiques fluorescentes du type humique et protéique, en azote total et en carbone organique total beaucoup plus importants (entre 5 et 10 fois plus). Cependant, tous les sites ne présentent pas d'augmentation significative des apports en matières en suspension et dissoutes, malgré l'ampleur des travaux réalisés.

Enfin la vulnérabilité climatique est approchée par l'étude de chroniques historiques sur plus de 60 ans. Les précipitations et les températures de trois stations météorologiques ainsi que les débits de deux sources et une rivière ont été analysés afin d'extraire les grandes tendances. En plus de l'augmentation de la tempéra-

ture ambiante de $+1.5^{\circ}\text{C}$ en 50 ans, les précipitations présentent une tendance à la baisse des cumuls annuels depuis 1980. La baisse des cumuls est plus particulièrement marquée à partir de 2003. Cette baisse de précipitation et l'augmentation des températures ont une répercussion quantitative sur les eaux de surface et souterraines. Les tendances observées sur les débits moyens annuels des systèmes étudiés sont en corrélation avec les précipitations. Malgré une tendance à la fonte des neiges de plus en plus précoce, les étiages basés sur les VCN10 ne montrent pas de réelles tendances à l'augmentation sur la période 1960-2011. Basées sur les données du GIEC 2007, les débits des sources subalpines ont été estimés pour les années 2030, 2050 et 2080. Les résultats montrent une diminution importante de la ressource en eau qui pourrait atteindre des baisses de l'ordre de 46% à l'horizon 2080.

Abstract

The subalpine and jura middle mountains are composed of a many karstic systems characterized by small size and area. For local towns, these systems can represent the only water resource. The catchment areas are mainly composed of forests and pastures and have a limited urbanisation. Local karst systems have quick flow transfer and are not really known in the region.

The main goal of this thesis is the study of the relationship between functioning and vulnerability of middle mountains karst systems. The vulnerabilities are analysed with three approaches : intrinsic, anthropogenic and climatic, applied on eight sites with variable natures (karst spring, karst conduit and rivers) which are additional.

The intrinsic vulnerability is studied by the use of PaPRIKa method. This method is based on the overlaying by weighting catchment area maps. Each map is represented by one criterion. Criteria used to carry out a final map are : Rock, Infiltration, Protection and karstification. The method allows the characterization of the vulnerability degrees on the catchment area. Although the study systems have hydrodynamic functioning and similar soil occupation, the vulnerability degrees change for each site.

Within the ALPEAU program, the soil remobilization due to silvicultural activities is used as an anthropogenic vulnerability factor on the catchment area. The study is focused on dissolved and suspended organic matter, especially the fluorescent organic matter. This work has begun with the study of the organic matter transfers during hydrological cycle in natural conditions (without anthropogenic activities). During or after silvicultural activities, karst waters can show turbidity peaks associated with concentration increasing of humic like, protein like, total nitrogenous and total organic carbon. However, all sites don't show a significant increase in spite of the intensity of silvicultural activities.

The climatic vulnerability is approached with the study of historical data since 60 years. The temporal evolution of precipitation, discharge and temperature have been analysed in order to extract global trends. Besides temperature increase (+15°C) since 50 years, the quantity of precipitations shows a decrease from 1980. This decrease is particularly accentuated since 2003. The decrease of precipitation and the increase of temperature lead an impact on the ground and fresh water quantity. Trends observed on mean annual discharge are correlated with the variation of precipitations. Despite an early snowmelt, low flow periods, defined by the VCN10,

ABSTRACT

don't show significant increase on the period 1960-2011.

Remerciements

C'est peut être, pour moi, la partie la plus importante et la plus facile à rédiger. Elle symbolise la fin d'un parcours de trois ans, mais surtout elle me permet de mettre en lumière toutes les personnes cachées qui ont rendu ce travail possible.

Je commencerai donc par remercier mes directeurs de thèse Dominique Gasquet, Marc Dzikowski et Fabien Hobléa pour m'avoir encadré et soutenu dans ce travail. Je les remercie surtout pour avoir pris du temps à m'écouter et à m'aiguiller dans mes recherches à mes moments perdus.

Je remercie aussi Jean Jacques Delannoy pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire EDYTEM.

Je remercie l'Assemblée des Pays de Savoie et l'Agence de l'Eau, mes financeurs, pour avoir cru et permis la réalisation de cette recherche. Mes remerciements vont également à Etienne Cholin et Matthieu Perrotton de Chambéry Métropole pour l'appui technique et financier qu'ils m'ont apporté.

Je tiens à adresser toute ma gratitude à mes collègues de travail Jerome Poulard, Yves Perrette, Fanget Bernard, Emilie Chalmin et Emmanuel Malet, pour l'aide qu'ils m'ont apporté pour la réalisation de mes analyses de spectrofluorescence, d'infrarouge et de chimie, et surtout à la compréhension de celles ci.

Je remercie également toutes les personnes qui se sont déplacées pour m'écouter et me conseiller sur les axes à suivre au cours de mes comités de thèse. Merci à Neville Josna, à Hervé Jourde, à Laurent Cadhillac et en particulier à Valérie Plagnes qui a pris une semaine de son temps pour me former à l'utilisation de la méthode PaPRIKa au sein de son université.

Mes remerciements vont également à mon jury de thèse : au Professeur Moun-taz Razack qui a accepté de présider ce jury, au Professeur François Zwahlen qui m'aura également suivi et apporté de bons conseils lors des réunions du programme Intereg Alpeau, au Professeur Frédéric Huneau pour ses remarques pertinentes pour la correction de ma thèse. Et enfin à Laurent Cadhilac et Hervé Jourde qui m'auront accompagné pendant trois ans par le biais de mes comités de pilotage de thèse.

Je tiens à adresser mes remerciement à Christelle Batiot-Guilhe pour m'avoir accueilli en urgence à l'Université de Montpellier 2 pour des analyses de fluorescence.

Je tiens à remercier Maxime, Yvon et Guillaume qui m'ont accompagné sur le terrain et travaillé sur mon sujet de thèse. Leur aide a été précieuse, j'espère qu'ils auront apprécié la vie laborantine. Je tiens à remercier particulièrement Thibault Blondel qui, à l'époque Post-Doctorant au laboratoire EDYTEM, a eu une très grande patience à m'écouter et m'expliquer les rudiments et les joies de la fluorescence de la matière organique.

Bien sur, je n'oublie pas mes collègues doctorants qui ont réussi à me supporter sur les trois ans de thèse. Je remercie sincèrement Jean-Phillipe, (E)laine, Melaine, Marie, Amandine, Timothée, Charlotte, Marine, Leila, eve, florence, Camille (la nouvelle despote), Grégoire, Pierre P., Pierre A., Thierry, Benjamin, Anouke, Carole, Bruno et Justine.

Enfin, je tiens à remercier particulièrement mes parents, mon frère et mes amis Pierre, Clémence, Emma, Damien, Marie, Aurélien et Arnaud qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu lors de mes moments de doute.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements	v
Table des matières	vii
Table des figures	xi
Liste des tableaux	xix
Introduction	1
I Etat des connaissances, méthodologie, présentation et caractérisation des sites d'étude	5
1 La vulnérabilité des aquifères karstiques	7
1 Le karst	7
1.1 Définition	7
1.2 Processus de karstification	9
1.3 Structure des systèmes karstiques	10
1.4 Fonctionnement des systèmes karstiques	14
1.5 Formation et caractérisation des constituants de la couverture pédologique	15
2 Le karst, un milieu vulnérable	22
2.1 Notion de vulnérabilité appliquée au karst	22
2.2 Etudes de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques	23
2.3 la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques	27
3 Etat des connaissances sur le changement climatique et son impact sur le milieu karstique de moyenne montagne	28
3.1 Caractérisation de l'évolution climatique dans les Alpes de Savoie	28
3.2 Impacts sur la qualité et la quantité des ressources karstiques en eau	31
3.3 Conclusion	32
2 Contexte général et présentation des sites	33
1 Contexte général de la zone d'étude	34
1.1 Géographie	34
1.2 Contexte structural	34
1.3 Unités stratigraphiques	38
1.4 Conditions climatiques	40

2	Présentation des sites d'études	44
2.1	La Roche Saint Alban	44
2.2	La Combe à Saint Cassin	46
2.3	Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey	48
2.4	Fontaines Froides aux Echelles	50
2.5	Le Creux des Elaphes	53
2.6	Bange – l'Eau Morte	53
2.7	Le Chéran	55
2.8	La source du Groin	58
3	Conclusion	59
3	Méthodologie d'acquisition et de traitement des données	61
1	Mesures de terrain	61
1.1	Suivi aux émergences	61
1.2	Suivi des sols	63
1.3	Suivi de l'épikarst	63
2	Mesures de laboratoire	63
2.1	Spectroscopie de fluorescence	63
2.2	Spectroscopie UV-visible	66
2.3	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier	67
2.4	COT et NT-mètre	67
2.5	Fluorescence	68
2.6	Infrarouges	74
3	Conclusion	75
4	Etudes des systèmes karstiques	77
1	Caractérisation et comparaison des fonctionnements des systèmes étudiés	77
1.1	Fonctionnement hydrodynamique	77
1.2	Apport de la physico-chimie	87
2	Caractérisation des sols des bassins versants	90
2.1	Description et analyses physico-chimiques des sols	90
2.2	Extrapolation aux autres sites d'études	98
3	Conclusion	100
 II Vulnérabilités des petits systèmes karstiques montagnards		
103		
5	Test de la méthode PaPRIKa pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des petits karsts de montagne	105
1	Principe de la méthode PaPRIKa	105
1.1	Définition des critères	106
1.2	Poids des paramètres et classes de vulnérabilité	111
1.3	Classification de la vulnérabilité générale	111
2	Calcul des critères pour les sites d'études	112
2.1	La Roche Saint Alban	112
2.2	La Combe à Saint Cassin	120

2.3	Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey	126
2.4	Fontaine Froide des Echelles	132
2.5	Bange - l'Eau Morte	138
3	Conclusion : bilan de la méthode pour les petits bassins d'alimentation karstiques	144
6	Vulnérabilité spécifique liée à la remobilisation anthropique ou naturelle des sols	147
1	Suivi des indicateurs pédologiques dans les eaux des systèmes karstiques étudiés	147
1.1	Validation du suivi en continu de la matière organique fluorescente	147
1.2	Etat des lieux des matières en suspension et dissoutes dans les eaux karstiques	149
2	Vulnérabilité spécifique anthropique : exemple de l'impact des activités forestières	167
2.1	Description et localisation des travaux sylvicoles sur les bassins d'alimentation d'étude	167
2.2	Recherche d'impact des activités sylvicoles	170
2.3	Conclusion	183
3	Conclusion (Conceptualisation / Caractérisation des écoulements au sein du système karstique	184
7	Vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques montagnards face au "changement climatique"	187
1	Traitement des données	188
1.1	Traitement spécifique des données	188
2	Etude de l'évolution du climat local	191
2.1	Analyse de l'évolution des températures	191
2.2	Analyse de l'évolution des Précipitations	195
2.3	Analyse de l'évapotranspiration	196
3	Analyse de l'évolution du débit	198
3.1	Le Chéran à la Charniaz	198
3.2	Station hydrométrique du Groin à Artemare	206
3.3	Bange - l'Eau Morte	215
4	Evolution la ressource en eau	222
4.1	Rappels sur les prévisions climatiques	222
4.2	Estimation de valeurs d'évapotranspiration réelle dans les pré-Alpes	223
5	Conclusions	225
	Conclusion Générale	229
	Bibliographie	235
	Annexe 1	249
	Annexe 2	253

TABLE DES MATIÈRES

Annexe 3	255
Annexe 4	259
Annexe 5	261

Table des figures

1.1	Réprésentation du système karstique [Agence RMC 1999]	8
1.2	L'aquifère karstique [Agence RMC 1999 (d'après Mangin 1975)]	10
1.3	Représentation d'un système karstique uniaire (a) et binaire (b) [Bas- sin Rhône-Méditerranée-Corse 1999]	11
1.4	Les transferts de l'eau dans le sol [Guide Alpeau 2012]	12
1.5	Représentation d'un système de type jurassien (a) et vaclusien (b) [Marsaud 1997]	14
1.6	Schéma du fonctionnement général des karsts [Mangin, 1975]	15
1.7	Principe d'humification [d'après Gallien]	17
1.8	Schéma d'extraction et de fractionnement de substances humiques. Composition et structures [Ndira 2006]	19
1.9	Modèle de structure des substances (a) humiques (b) fulvique [An- dreux et Munier-Lamy 1994]	20
1.10	Structure des acides aminés (a) Tyrosine (b) Tryptophane	21
1.11	Structure de la cellulose	21
1.12	Structure de la lignine	22
1.13	Comparaison entre les principales méthodes de cartographie de la vul- nérabilité (EPIK, COP, PI, RISKE) des bassins versants de systèmes karstiques appliquées sur le causse de Quercy [Pranville 2007]	26
1.14	Les différents périmètres de protection au sein d'un bassin versant [Vernoux et Buchet 2010]	28
1.15	Ecart moyen annuel de la température de la montagne savoyarde de 1950 à 2009 par rapport à la normale 1971/2000 [Livre blanc du climat en Savoie 2010]	29
1.16	Evolution des totaux de précipitations annuelles à Bourg-Saint-Maurice de 1947 à 2009. <i>Météo-France</i>	30
1.17	Evolution des cumuls de neige fraîche à Peisey-Nancroix de 1959/1960 à 2009/2010. <i>Météo-France</i>	31
2.1	Répartition des domaines karstiques en France [Marsaud 1997]	33
2.2	Schéma structural de la zone d'étude et localisations des sites d'étude	36
2.3	Style tectonique des Chaînes subalpines septentrionales : le massif des Bauges et le N de la Chartreuse [Debelmas 1974]	37
2.4	Log stratigraphique synthétique du secteur d'Aix les Bains [Carfantan 1994]	39
2.5	Carte des précipitations moyennes annuelles (1992/2009) en milli- mètres sur l'Ouest de la Savoie [Météo France]	40

2.6	Courbes ombro-thermiques de Gaussen de trois stations météorologiques : La Féclaz, La Dent du Chat et Voglans [2006-2010]	42
2.7	Ecart à la moyenne pluviométrique annuelle à la station de Voglans de 1974 - 2011 (a) et de 2000 - 2011 (b)	43
2.8	Précipitations mensuelles de la période d'étude comparées aux moyennes de la station de Voglans (1974-2011)	43
2.9	Evacuation du trop plein des sources hautes de La Roche Saint Alban	45
2.10	Coupe géologique interprétative passant par la source de La Roche Saint Alban	45
2.11	Représentation des fractures et de la rosace en longueur cumulée des directions de fracturations du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban	46
2.12	Captage de la source de La Combe	47
2.13	Coupe géologique interprétative NNE-SSW passant par La Combe	47
2.14	Coupe géologique interprétative WNW-ESE au niveau de La Combe	48
2.15	Captage de la source de Fontaine Noire	48
2.16	Coupe géologique interprétative SSW-NNE au niveau de Fontaine Noire	49
2.17	Topographie de la grotte de Fontaine Noire [cds73 1975]	49
2.18	Captage de la source karstique de Fontaine Froide [Hobléa 2008]	50
2.19	Dispositif structural de la Chartreuse et de la terminaison méridionale du Jura [Gidon 1990]	51
2.20	Topographie du réseau des Echelles (www.Plongéessout.fr)	52
2.21	Cartographie spéléo-morphologique du Creux des Elaphes [Hobléa 1997]	53
2.22	Coupe perpendiculaire à l'axe de l'anticlinal du Semnoz [Mathevet 2002]	54
2.23	Topographie du réseau Bange – l'Eau Morte (Plongéessout)	55
2.24	Le Chéran [photographie de Pegeot 2011]	55
2.25	Présentation du bassin versant du Chéran [Lecuret <i>et al.</i> 2010]	57
2.26	Le trop plein de la source du Groin [photographie de Grinand 2010]	59
3.1	Diagramme du protocole expérimental (d'après Dzikowski	62
3.2	Diagramme de Perrin-Jablonski	64
3.3	Allure du spectre de MEE sous forme de pics (a), sous forme de courbes de niveau (b) [Blondel 2008]	66
3.4	Localisation des pics de matières organiques dans une matrice d'émission et d'excitation	68
3.5	Exemple de résultat obtenu par l'analyse PARAFAC	69
3.6	Matrice d'émission et d'excitation, exemple du 16/06/2010 à La Roche Saint Alban	70
3.7	Décomposition du signal d'émission pour une longueur d'excitation à 330 nm obtenue par fluorescence représentant l'intensité en fonction des longueurs d'ondes d'émission	71
3.8	Décomposition du signal d'émission pour une longueur d'excitation à 280 nm obtenue par fluorescence représentant l'intensité en fonction des longueurs d'ondes d'émission	72

3.9	Comparaison des résultats entre l'analyse PARAFAC et la méthode de modélisation du signal de fluorescence des matières organiques du type (A) humique, (B) protéique et (C) issue de la production bactérienne	73
3.10	Exemple d'une analyse d'un spectre infrarouge	74
4.1	Corrélogramme simple Débit-Débit (journalier)	78
4.2	Corrélogramme croisé Pluie-Débit	79
4.3	Décomposition de la récession	80
4.4	Classification des systèmes karstiques dans le diagramme de Mangin .	82
4.5	Allure des différentes hystérésis et leurs significations [in Lefrançois <i>et al.</i> 2007]	83
4.6	Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit sur 3 périodes hydrologiques de La Roche Saint Alban	84
4.7	Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit sur 3 périodes hydrologiques de La Combe	85
4.8	Hystérésis de Fontaine Noire observées sur 3 périodes hydrologiques .	86
4.9	Détermination du régime de la source du Groin et de la rivière du Chéran par les coefficient de Pardé	87
4.10	Représentation des faciès chimiques des eaux dans un diagramme de Piper	88
4.11	Distribution des données journalières des conductivités triées par classe sur la période 2009 - 2010	89
4.12	Pourcentage cumulé de la turbidité des eaux de 3 sources karstiques au cours de l'année 2010	89
4.13	Illustration des différents sols rencontrés sur le bassin d'alimentation de la Roche Saint Alban	90
4.14	Analyses infrarouges des sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban	93
4.15	Illustration des différents sols rencontrés sur le bassin d'alimentation de La Combe	95
4.16	Analyses infrarouges des sols du bassin d'alimentation de La Combe .	98
4.17	Deux types de faciès du bassin d'alimentation de Fontaine Noire : (A) le calcaire Urgonien et (B) les argiles rouges	99
5.1	Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban	114
5.2	Carte de vulnérabilité selon l'indice R du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban	115
5.3	Carte de vulnérabilité selon l'indice I du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban	116
5.4	Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban	117
5.5	Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban	119

5.6	Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe	121
5.7	Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe	122
5.8	Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe	123
5.9	Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe	124
5.10	Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe	125
5.11	Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire	127
5.12	Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire	128
5.13	Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire	129
5.14	Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire	130
5.15	Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire	131
5.16	Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide	133
5.17	Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide	134
5.18	Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide	135
5.19	Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide	136
5.20	Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide	137
5.21	Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte	139
5.22	Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte	140
5.23	Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte	141
5.24	Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte	142

5.25	Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte	143
6.1	Représentation de l'intensité du type humique suivi à 310 nm par le fluorimètre de terrain en fonction de la concentration du type humique mesurée en spectrofluorimétrie 3D (mol/L. QSU)	148
6.2	Superposition du seuil de détection du fluorimètre de terrain avec les mesures du spectrofluorimètre (a.) à 280 nm et (b.) à 310 nm d'excitation	148
6.3	Correlogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Roche Saint Alban	150
6.4	Correlogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) basses eaux, (b) moyennes eaux et (c) hautes eaux pour le système karstique de La Roche Saint Alban . . .	150
6.5	Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Roche Saint Alban	151
6.6	Correlogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Combe	152
6.7	Correlogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) Mai 2011 et (b) février 2010 pour le système karstique de La Combe	153
6.8	Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Combe	153
6.9	Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction de l'intensité de fluorescence de la matière organique du type humique sur 2 périodes hydrologiques : en basses eaux (noir) et en moyennes eaux (rouge) sur le système karstique de La Roche Saint Alban	155
6.10	Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Roche Saint Alban	156
6.11	Etude des arrivées des matières organiques du type humique et des matières en suspension (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (T/F) (b) lors d'une crue d'été sur le système karstique de La Roche Saint Alban	157
6.12	Courbe d'hystérésis de la turbidité en fonction de l'intensité de fluorescence de la matière organique du type humique en automne 2011 sur le système karstique de La Combe	158
6.13	Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Combe	160
6.14	Etude des arrivées de matières organiques du type humique et de MES (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (b) lors d'une crue d'automne sur le système karstique de La Combe	161
6.15	Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matières organiques fluorescentes du type humique pour le système karstique de La Roche Saint Alban	162

6.16	Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matière organique fluorescente du type humique pour le système karstique de La Combe	163
6.17	Reconstitution de la chronique du flux de carbone organique total en fonction du cycle hydrologique sur le système karstique de La Roche Saint Alban	164
6.18	Suivi de la turbidité, du nombre de bactéries, du COT, de Nt, et des matières organiques fluorescentes au cours d'une crue d'Octobre 2011 sur les sites de (a) La Roche Saint Alban et de (b) La Combe	166
6.19	Photographies présentant l'impact visuel des activités sylvicoles sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques (A) de La Roche Saint Alban, (B) de La Combe, (C) du Creux des Elaphes et (D) de Fontaine Noire	168
6.20	Cartes de Vulnérabilité de La Roche Saint Alban, de La Combe et de Fontaine Noire réalisées à partir de la méthode PaPRIKa	169
6.21	Chronique de l'impact des travaux de sylviculture du site de La Combe (La bande rouge représente la durée des travaux)	171
6.22	Suivi physico-chimique d'un écoulement épikarstique sous un organosol	173
6.23	Suivi physico-chimique d'un écoulement épikarstique sous un sol brun	174
6.24	Suivi de la matière organique fluorescente dans deux écoulements épikarstiques (organosol en haut, sol brun en bas)	175
6.25	Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban	177
6.26	Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban	178
6.27	Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de Fontaine Noire	180
6.28	Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de Fontaine Noire	181
6.29	Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de Fontaine Froide	182
6.30	Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de Fontaine Froide	183
6.31	Schématisation des transferts au sein d'un système karstique	185
7.1	Pic de crue marquant le début de la fusion printanière, exemple sur la chronique de 1982 de Bange - l'Eau Morte	190
7.2	Courbes ombro-thermiques de Gaussen de trois stations météorologiques : Lescheraines, Aillon-le-Jeune et Voglans (2000-2004)	191
7.3	Ecart à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées à la station de Voglans (1974-2011)	192
7.4	Ecart à la moyenne des températures moyennes mensuelles mesurées à la station de Voglans (1974-2011)	193
7.5	Comparaison des écarts à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées aux stations de Aillon-le-Jeune, de Lescheraines et de Voglans (1981-2010)	194

7.6	Comparaison des écarts à la moyenne des précipitations moyennes annuelles mesurées aux stations de Aillon-le-Jeune et de Lescheraines (1950-2010)	195
7.7	Ecarts à la moyenne des déficits annuels calculés par l'équation de Turc pour les données de la station de Lescheraines (1950-2011) . . .	196
7.8	Ecarts à la moyenne des précipitations moyennes mensuelles mesurées à la station de Lescheraines (1950-2011)	197
7.9	Débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	198
7.10	Ecarts à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	199
7.11	Ecarts à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	199
7.12	Ecarts à la moyenne du débit instantané maximal annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	200
7.13	Ecarts à la moyenne du débit instantané minimal annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	201
7.14	Ecart à la moyenne des débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	202
7.15	Fréquence annuelle des crues mesurées à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	203
7.16	Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	204
7.17	Nombre de jours ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	204
7.18	Coefficient de corrélation annuel calculé à la station du Chéran (1960-2011)	205
7.19	Date du premier pic de crue marquant de la fusion printanière à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)	206
7.20	Débits moyens mensuels mesurés à la station du Groin (1961-2011) .	206
7.21	Ecarts à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la station du Groin (1961-2011)	207
7.22	Ecarts à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station du Groin (1961-2011)	208
7.23	Ecarts à la moyenne du débit instantané maximal mesuré à la station du Groin (1961-2011)	209
7.24	Ecarts à la moyenne du débit instantané minimal mesuré à la station de la source du Groin (1961-2011)	210
7.25	Ecart à la moyenne des débit moyen mensuel mesuré à la station du Groin (1961-2011)	211
7.26	Fréquence des crues mesurées à la station du Groin (1961-2011) . . .	212
7.27	Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ mesuré à la station du Groin (1961-2011)	213
7.28	Nombre de jours total ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ mesuré à la station du Groin (1961-2011)	213
7.29	Coefficient de corrélation annuel calculé à la station de la source du Groin (1961-2011)	214

7.30	Date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière à la station du Groin (1961-2011)	214
7.31	Débits moyens mensuels mesurés à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	215
7.32	Ecarts à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	216
7.33	Ecarts à la moyenne du débit instantané maximal mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	216
7.34	Ecarts à la moyenne du débit instantané minimal mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	217
7.35	Ecart à la moyenne des débit moyen mensuel mesuré à la station de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	218
7.36	Fréquence des crues à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002) . .	219
7.37	Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	220
7.38	Nombre de jours total ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	220
7.39	Coefficient de corrélation annuel calculé à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	221
7.40	Date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)	222
7.41	Comparaison entre les données de débits du Chéran observées et simulées à partir du calcul de l'évapotranspiration	223

Liste des tableaux

2.1	Paramètres issus de l'analyse des courbes de récession	52
2.2	Débits moyens du Chéran [données Agence de l'Eau]	56
2.3	Synthèse des données des systèmes étudiés, le "-" correspond à des cas particuliers	60
3.1	Caractéristiques des fluorophores retrouvés dans les eaux karstiques .	72
4.1	Paramètres issus de l'analyse des courbes de récession	81
4.2	Volume dynamique spécifique	81
4.3	Données physico-chimiques des différents sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban	92
4.4	Identification des matières organiques fluorescentes en fonction des différents sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban . . .	94
4.5	Données physico-chimiques des différents sols du bassin d'alimentation de La Combe	97
5.1	Description de l'état de surface dans les bassins versants des pertes [Döerfliger et Plagnes 2009]	106
5.2	Tableau de détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux [Döerfliger et Plagnes 2009] . . .	107
5.3	Tableau de détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur [Döerfliger et Plagnes 2009] . . .	107
5.4	Tableau de détermination des classes du critère S à partir uniquement des classes d'épaisseur et de la pierrosité [Döerfliger et Plagnes 2009] .	107
5.5	Description du critère E – "aquifère épikarstique"	108
5.6	Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée	108
5.7	Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation	109
5.8	Tableau des classes de vulnérabilité globale	112
5.9	Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban	115
5.10	Les trois jeux de pondérations utilisés pour combiner les quatre cartes de vulnérabilité	118
5.11	Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de La Combe	122
5.12	Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Fontaine Froide	134

5.13	Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte	140
6.1	Présentation des espèces fluorescentes identifiées dans les eaux des sources karstiques de La Roche Saint Alban, La Combe, Fontaine Noire et Fontaine Froide.	149
6.2	Types et caractéristiques des travaux réalisés sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques de La Roche Saint Alban (RSA), La Combe (LC) et Fontaine Noire (FN)	167
6.3	Valeur des paramètres suivis avant et après les travaux de sylviculture sur le bassin d'alimentation de La Combe	172
6.4	Valeur des paramètres physico-chimiques avant et après les travaux de sylviculture sur le site du Creux des Elaphes	174
6.5	Valeur des matières organiques fluorescentes avant et après les travaux de sylviculture sur le site du Creux des Elaphes	176
7.1	Evolution de l'évapotranspiration en fonction des modifications des températures et de précipitations basées sur la période 1960 - 2010 . .	224
7.2	Evolution de l'évapotranspiration en fonction des modifications des températures et de précipitations basées sur la période 2000 - 2010 . .	224
7.3	Estimations des débits en 2030, 2050 et 2080 pour le Chéran, le Groin et Bange - l'Eau Morte	225

Introduction

Dans les pré-alpes du Nord, la gestion de la ressource en eau est un enjeu important. Pour certaines communes, la seule ressource en eau exploitable provient des systèmes karstiques. Ceux-ci sont généralement de petite taille et de petite surface. Leurs bassins d'alimentation sont généralement constitués de forêts et de pâturages avec une urbanisation et des activités humaines peu développées. La forêt est reconnue comme étant un filtre naturel des eaux de pluie, elle permet donc de protéger les eaux souterraines. Cette eau souterraine issue de bassins d'alimentation boisés est en général de très bonne qualité et n'a donc pas toujours besoin d'être traitée pour servir d'eau potable. Toutefois, des analyses d'eau indiquent régulièrement la présence de bactéries et de pics de turbidité. Ces deux paramètres sont des critères majeurs pour la potabilité des eaux. En plus d'une pollution avérée, les systèmes karstiques sont marqués par des sécheresses de plus en plus récurrentes, mises en valeur entre autres avec la canicule de 2003.

Cette thèse s'attache à l'étude de la réponse des petits systèmes karstiques aux modifications des conditions environnementales liées au changement climatique et aux activités humaines. Plus particulièrement, cette recherche porte donc sur la vulnérabilité vis à vis de trois approches : intrinsèque, anthropique et naturelle. Sur la région, très peu de systèmes karstiques sont suivis de manière intensive, il a donc été décidé de démarrer l'étude sur des sites pilotes. Ceux-ci devaient être représentatifs des différents systèmes potentiels des régions de moyennes montagnes. Le but est de caractériser à court terme le fonctionnement hydrodynamique et les transferts de matières dissoutes et en suspension au sein des systèmes karstiques. Il sera ainsi permis de définir des indicateurs potentiels du changement climatique et des activités anthropiques. Pour cela, des données historiques ont été étudiées afin de mieux cerner les modifications liées au changement climatique et aux activités anthropiques à long terme.

Les problématiques de la thèse reposent sur plusieurs axes complémentaires :

- **étudier en détail et comprendre le fonctionnement hydrologique des systèmes karstiques ;**
- **définir les différents degrés de vulnérabilité au sein des bassins d'alimentation des systèmes étudiés et entre les systèmes karstiques ;**
- **analyser les transferts naturels des matières en suspension et dissoutes au sein des systèmes karstiques ;**
- **déterminer des indicateurs liés à la remobilisation du sol suite à des travaux anthropiques pouvant entraîner un impact sur la qualité des eaux karstiques ;**
- **appréhender les conséquences et l'évolution de la qualité et de la quan-**

tité des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.

Pour répondre à une partie de ces questions, la thèse a fait l'objet d'un partenariat dans le cadre d'un projet Intereg franco-suisse appelé ALPEAU (2009-2011). L'étude portait du principe que les activités sylvicoles réalisées sur ce type de bassin versant sont supposées avoir une influence sur la qualité des eaux des systèmes karstiques. Les forestiers n'ont pas toujours connaissance des impacts qu'ils pourraient provoquer sur la ressource en eau. Ainsi, une étude visant à déterminer les relations entre les activités forestières et la protection des milieux karstiques forestiers a été lancée. Le projet ALPEAU était supervisé pour la Suisse par l'Université de Neuchâtel et par l'ONF pour la France. Ce partenariat visait à consolider et pérenniser le rôle protecteur de la forêt, pour les ressources en eau potable, dans un contexte d'inquiétude des usagers sur l'évolution générale de la qualité de la ressource en eau. Son objectif était notamment de préciser les modalités de protection efficaces et adaptées des captages d'eau en forêt et d'établir des liens contractuels directs entre les collectivités en charge de l'approvisionnement en eau et les acteurs forestiers. Le côté scientifique cherchait à déterminer le rôle du sol, de la végétation et du sous sol dans la filtration des eaux.

L'un des objectifs français du programme était consacré à l'impact des activités sylvicoles sur la qualité des ressources en eaux karstiques. Bien qu'une partie traite de pollutions accidentelles (hydrocarbures, huile de moteur, ...), la thématique principale s'intéresse à la remobilisation du sol et de son transfert au sein des systèmes karstiques. Il a donc été demandé de trouver des indicateurs pertinents susceptibles d'identifier cette remobilisation et de définir les zones de vulnérabilité au sein du bassin d'alimentation (Méthode PaPRIKa). Dans le cadre de cette étude, Chambéry-Métropole en collaboration avec le laboratoire EDYTEM ont sélectionné et équipé quatre captages de sources karstiques. Les systèmes karstiques possèdent des bassins versants essentiellement composés de forêts et présentent des activités sylvicoles.

L'Agence de l'Eau co-financeur de la thèse (le second financeur est l'Assemblée des Pays de Savoie) et la DREAL de bassin ont constitué une cellule de travail commune pour aborder la question des vulnérabilités du bassin RMC aux incidences du changement climatique. L'Agence de l'Eau a prévu d'établir une synthèse des connaissances scientifiques sur les incidences du changement climatique pour l'eau et les milieux aquatiques pour dégager les phénomènes qui peuvent déjà initier des stratégies précises d'adaptation et les questions scientifiques dont il serait important de prendre la mesure avec les chercheurs. C'est pour cette raison qu'il a été demandé de travailler sur l'impact du changement climatique au niveau de la qualité et la quantité de la ressource en eau karstique. Ainsi, trois sites ont été retenus, ils possèdent une chronique suffisamment longue (plus de 50 ans) pour identifier des tendances liées à l'évolution du climat.

Cette thèse se décompose en deux grandes parties divisées en sept chapitres. La première partie, découpée en 4 chapitres, débute avec la présentation de l'état de l'art basé sur la définition du karst et les études de la vulnérabilité des systèmes karstiques

d'un point de vu intrinsèque, anthropique et climatique. Le second chapitre traite du contexte général (géographique et géologique) et présente les huit sites d'études. Le troisième chapitre explique le protocole expérimental de l'étude, la méthodologie d'analyse et le traitement des données. Enfin le quatrième chapitre consiste en l'étude du fonctionnement et de la caractérisation des systèmes karstiques.

Les trois chapitres de la deuxième partie sont consacrés à la vulnérabilité des systèmes karstiques étudiés. Le premier s'attache à l'étude de la vulnérabilité au sein des bassins d'alimentation des systèmes karstiques par l'application de la méthode PaPRIKa. A partir de l'étude du fonctionnement des systèmes karstiques et de l'évolution des matières en suspension et dissoutes aux émergences, le deuxième chapitre est consacré à l'identification d'indicateur des activités anthropiques sur les bassins d'alimentation. La finalité est de définir les paramètres importants à l'identification d'un impact suite à une remobilisation des sols. Enfin, le dernier chapitre présente l'analyse réalisée sur des longues chroniques de températures, précipitations et débits dans le but de mettre en évidence des tendances en relation avec le changement climatique.

Première partie

Etat des connaissances,
méthodologie, présentation et
caractérisation des sites d'étude

Chapitre 1

La vulnérabilité des aquifères karstiques

1 Le karst

1.1 Définition

Le mot karst vient de la traduction du mot slovène "Kras" qui désigne une région du Nord-Est de l'Adriatique comprise entre le golf de Trieste, la vallée de la Vipava, la vallée de la Rasa et le secteur de Rečka. Cette région à dominante calcaire présente une morphologie particulière de vallées sèches, de dépressions fermées et de manifestations spectaculaires telles que des grottes, gouffres et rivières souterraines (Figure 1.1). Le karst est un paysage façonné dans une roche soluble. Ces roches peuvent être regroupées en trois grandes familles, la plus représentative est celle des roches carbonatées, constituées essentiellement par des calcaires et des dolomies. Les 2 autres sont la famille des roches sulfatées et la famille des roches salines et apparentées [Salomon 2006].

La définition du karst s'est longtemps séparée en deux approches, bien qu'elles soient complémentaires, à savoir une approche géomorphologique et une approche hydrogéologique. En 1973, Gêze propose une approche géomorphologique du karst en définissant le karst comme *"région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques"*. Bakalowicz [1999] complète cette définition géomorphologique du karst de la manière suivante *"Le karst est l'ensemble des formes superficielles et souterraines résultant de la dissolution des roches carbonatées (calcaire, dolomie) par l'eau rendue acide par le carbone ; par extension l'ensemble des formes comparables se développant dans les roches salines (gypse, anhydrite, halite)"*. Cependant, d'un point de vue hydrogéologique, le karst est un aquifère, où les circulations souterraines et superficielles sont en étroite interaction. Il comporte en amont un massif formé de roches perméables et solubles qui sert d'impluvium (espace recueillant les eaux de pluie) et dans lequel la circulation de l'eau s'organise souterrainement. Le massif peut être associé ou non à une zone imperméable permettant le ruissellement. Le karst constitue bien souvent une ressource en eau non négligeable, celle-ci peut alimenter un ou plusieurs points d'émergence. Dès 1967, Castany dé-

finir le karst comme possédant une continuité hydraulique et des conditions aux limites communes à l'ensemble de l'aquifère. Il propose, ainsi, de dénommer "*ensemble (aquifère) karstique*" un ensemble hydrogéologique carbonaté constitué d'un ou plusieurs systèmes karstiques. Mangin [1974] définit le système karstique comme "*l'ensemble au niveau duquel les écoulements souterrains de type karstique s'organisent pour constituer une unité de drainage. Le système karstique correspond donc au bassin hydrogéologique d'alimentation d'une source karstique ou d'un groupe de sources karstiques liées les unes aux autres*". Enfin Hobléa [1999] essaie de donner une définition de type encyclopédique en regroupant les deux approches, il définit le karst comme "*un agencement de formes superficielles et souterraines, et de vides développés dans les trois dimensions, créés dans un volume de roche carbonatée ou d'évaporite par l'action de divers processus morphogénique (karstification) dont le principal est la dissolution sous l'effet de circulations d'eau anisotropes et hétérogènes utilisant dans un premier temps la perméabilité fissurale du volume rocheux pour former, à l'échelle géologique des temps (quelques dizaines de millénaires au minimum), une unité de drainage souterrain hiérarchisé en direction d'une source, cette unité étant appelée «système karstique»*".

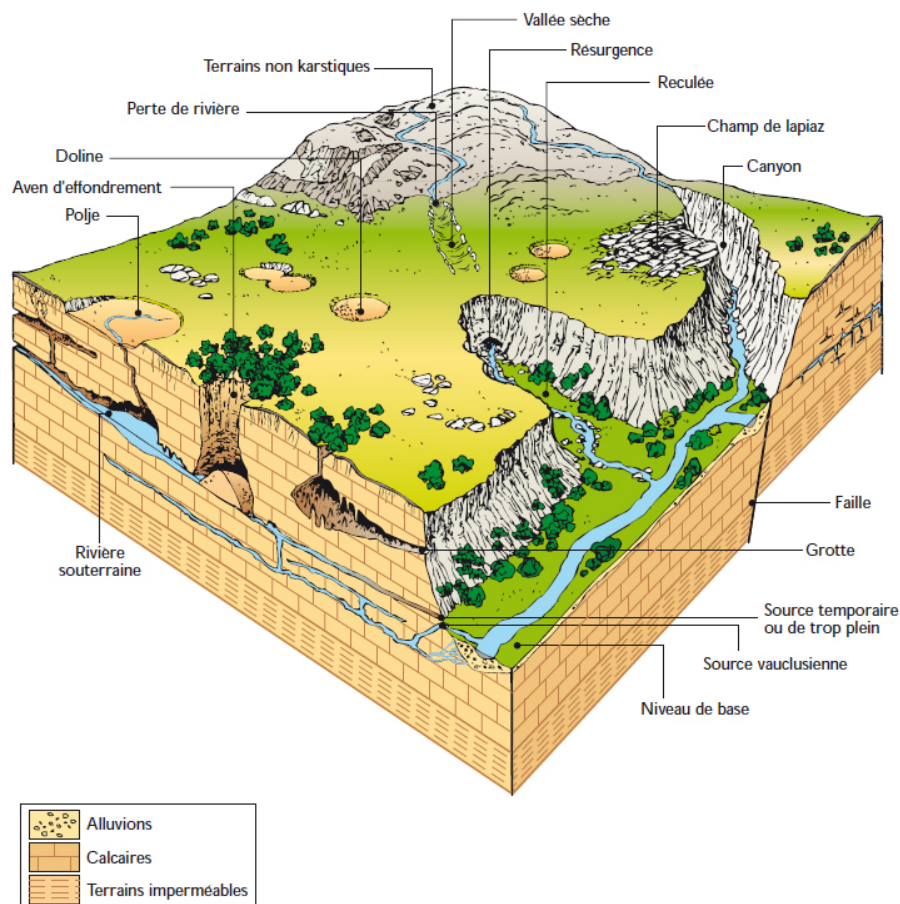


FIGURE 1.1 – Représentation du système karstique [Agence RMC 1999]

1.2 Processus de karstification

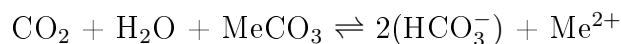
Le processus de karstification est un phénomène lié à la dissolution de la roche calcaire par des eaux naturelles chargées en CO_2 . Le processus de dissolution est lui-même assez court et sa durée peut varier de quelques jours à quelques semaines selon que la pression partielle en CO_2 est faible (10^{-3} atm.) ou forte ($2 \cdot 10^{-2}$ atm.). Une eau pure peut dissoudre au maximum 13 mg.L^{-1} à 16°C [Salomon 2006]. La teneur en pCO_2 a principalement pour origine la respiration racinaire et la dégradation de la matière organique par les organismes du sol. Dans certains cas le CO_2 peut provenir d'une circulation d'air dans le sous-sol ou d'un dégazage profond et/ou volcanique [Blondel 2008].

La température est aussi un des facteurs principaux qui influent sur la vitesse de dissolution des carbonates [Salomon 2006]. En théorie, la mise en solution du CO_2 est d'autant plus importante que l'eau est froide.

La cinétique de la dissolution dépend aussi de facteurs physiques, tels que la fracturation originelle de la roche (qui permet un transport plus rapide en profondeur d'une eau chargée en CO_2). La lithologie issue des différents environnements de dépôts des sédiments carbonatés joue sur la solubilité : ainsi, une roche provenant de sédiments de récifs ou de talus sera plus aisément karstifiable qu'une roche originaire de sédiments pélagiques [Palmer 1991].

D'autres facteurs peuvent intervenir tels que la disposition lithologique des différentes couches, la présence de niveaux imperméables non calcaires, l'épaisseur de la série karstifiable, etc [Cucchi *et al.* 1998]. La formation des karsts est liée à une baisse du niveau de base (d'origine climatique ou tectonique), à l'augmentation de l'accommodation karstique et au potentiel karstique [Aunay and Le Strat 2002]. En période de régression, l'accommodation karstique est considérée comme le volume disponible entre le niveau de base d'un karst d'âge donné et la paléosurface qui lui est connectée dans une même séquence tectono-eustatique. Lors d'une transgression, l'accommodation définit l'espace disponible pour déposer les sédiments en période d'ennoyage dans un karst à un âge donné. En résumé, la somme des accommodations karstiques correspondent à l'épaisseur potentiellement karstifiée. Le potentiel karstique est défini par l'importance du gradient hydraulique (différence de la charge hydraulique, entre la zone d'alimentation de l'aquifère et l'exutoire), ainsi que par l'acidité du solvant (eau et CO_2) qui permet une dissolution de la roche encaissante.

Les écoulements de la phase liquide engendrent et conditionnent les écoulements de la phase gazeuse (écoulement biphasique) : cette dernière phase ne pouvant s'échapper, il peut se produire une mise en pression dans le drain entraînant une corrosion (karstification). Cette action est représentée selon l'équation générale :



Me représente un cation divalent associé au carbonate, il correspond au calcium (Ca^{2+}) ou au magnésium (Mg^{2+}).

Cette équation synthétise toutes les équations des équilibres du système calco-carbonique. Les espèces carbonatées sont représentées généralement sous la forme HCO_3^- alors qu'il coexiste trois autres formes dans l'eau :

- ◇ CO_3^{2-} , l'ion carbonate ;
- ◇ H_2CO_3 , l'acide carbonique ;
- ◇ CO_2 aqueux, le CO_2 dissout.

La circulation de l'eau au sein de l'aquifère, par l'intermédiaire d'un gradient hydraulique, est définie comme une condition nécessaire et suffisante, déterminant l'existence ou non d'une karstification. Cette compétition entre la vitesse de dissolution et la dynamique des écoulements souligne une autre particularité de la karstification : le phénomène d'auto-organisation des vides, permettant une hiérarchisation de ces derniers et l'élaboration de tout un réseau de drainage souterrain [Bakalowicz 1976].

1.3 Structure des systèmes karstiques

Les systèmes karstiques montrent une grande variabilité en fonction de leurs structures et de leurs fonctionnements. La configuration des aquifères karstiques dépend principalement de la nature de l'impluvium et de l'état de karstification du massif [Marsaud 1997]. L'organisation de ce type de système se définit en trois grandes parties représentées par la **zone d'alimentation**, la **zone d'infiltration** et la **zone saturée**. La Figure 1.2 schématise la structure générale d'un système karstique.

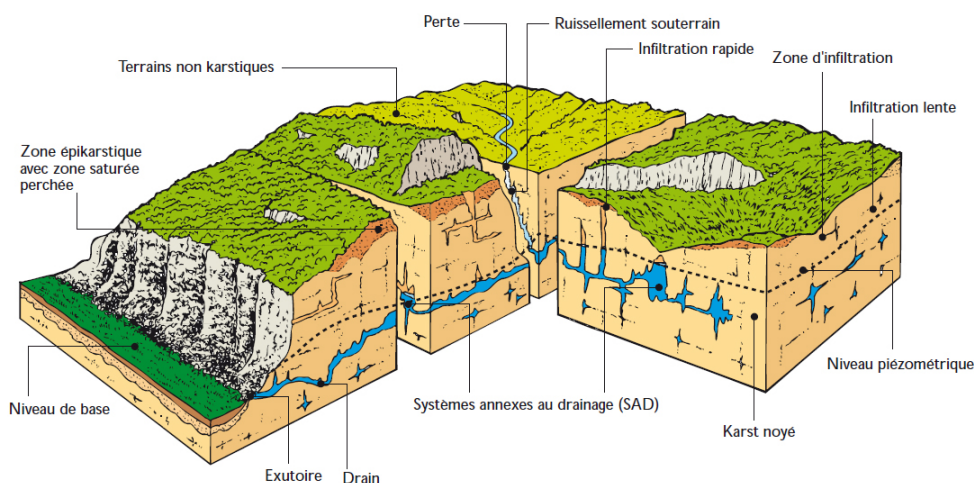


FIGURE 1.2 – L'aquifère karstique [Agence RMC 1999 (d'après Mangin 1975)]

La zone d'alimentation (impluvium) :

L'impluvium d'un système karstique se caractérise selon le type de terrain qui le compose. Si l'impluvium n'est défini que par des terrains karstiques alors le système est dit unaire (Figure 1.3 a). L'infiltration de l'eau est diffuse à l'échelle du massif mais les vitesses peuvent être lentes ou rapides [Bakalowicz 1995]. Si l'impluvium est un mélange constitué de terrains karstiques et non karstiques alors le système est dit binaire (Figure 1.3 b). Le système est équivalent à l'aquifère karstique mais aussi à un bassin de surface drainé par des pertes. La partie non karstique de l'impluvium entraîne la concentration des eaux d'infiltration, accélérant et augmentant le développement de la structure drainante. Elle peut aussi avoir une influence sur

le transfert des écoulement et avoir un effet retard qui peut perturber le retour au débit de base après une crue [Soulios 1991]. Les eaux de surface en ruisselant peuvent apporter des particules fines favorisant le colmatage des fissures des carbonates [Peyraude 2011].

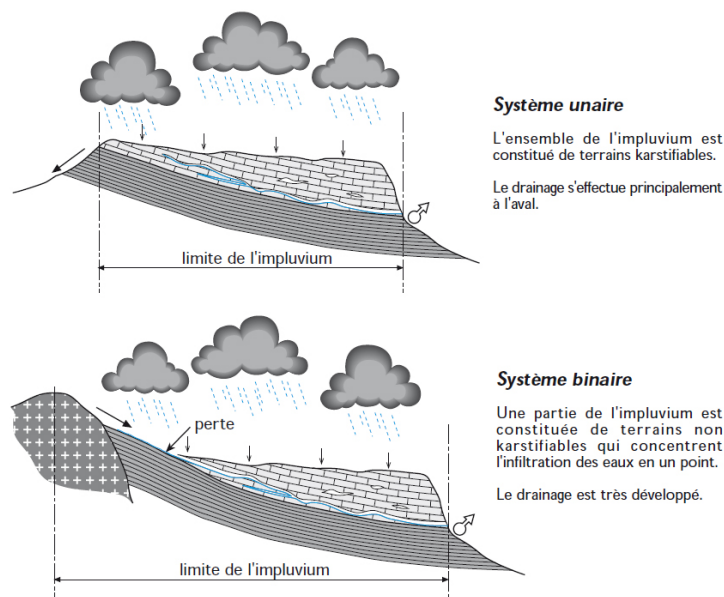


FIGURE 1.3 – Représentation d'un système karstique unaire (a) et binaire (b) [Bassin Rhône-Méditerranée-Corse 1999]

La zone d'infiltration :

La zone d'infiltration s'organise en trois compartiments distincts : le sol, l'épi-karst et la zone non saturée. En fonction du climat, de l'environnement et de la lithologie, un ou deux compartiments peuvent être absents. Chaque compartiment possède une identité qui lui est propre, il possède cependant les deux mêmes fonctions, à savoir un rôle transmissif et un rôle capacitif. De nombreux modèles ont été développés pour appréhender les interactions entre ces trois compartiments [Gunn 1983, Williams 1983, Kiraly *et al.* 1995, Trček 2007].

Le sol

Le sol est un milieu triphasique qui se caractérise par une phase solide (minérale et organique), une phase liquide et une phase gazeuse (l'atmosphère du sol). Il représente un milieu organisé et structuré. Plusieurs niveaux d'organisation doivent être considérés, depuis l'agrégat de constituants élémentaires, jusqu'au système pédologique défini par la nature des horizons qui le constituent et la distribution des horizons dans le paysage. Pour comprendre le fonctionnement d'un tel système, il faut tenir compte à la fois des propriétés intrinsèques des divers horizons et de leur arrangement au sein de la couverture pédologique.

Dans les milieux karstiques, le sol possède ou peut posséder un rôle de filtre. La présence de vie (bactéries, champignons, invertébrés) dans le sol permet un recyclage de la matière organique et minérale. Les eaux de pluies qui arrivent sur le sol peuvent être chargées en polluants ; ceux-ci peuvent être retenus par la végétation (principe de la remédiation), se complexer avec la matière organique, être dégradés

par des organismes vivants ou simplement traverser le sol. L'infiltration des eaux est dépendante de la perméabilité, de la porosité et de la capacité de stockage. Le sol est donc un milieu complexe, par sa composition qui évolue en fonction de la profondeur, mais aussi par ses discontinuités latérales variables en fonction de la végétation. Dans les milieux de moyenne montagne, la végétation évolue par étage selon l'altitude passant de l'étage collinéen (inférieur à 900 m) à l'étage montagnard (900 à 1600 m), pour atteindre l'étage subalpin (1600 à 2300 m).

Les eaux qui arrivent sur le sol auront des destins différents, la Figure 1.4 résume les possibilités de transfert des eaux (dans cette figure les calcaires sont considérés comme peu perméables et la quantité d'eau transférée est proportionnelle à la taille des flèches). Globalement, une partie de cette eau est interceptée par le couvert végétal et subit l'évapotranspiration, et une autre partie s'infiltrate et/ou ruisselle.

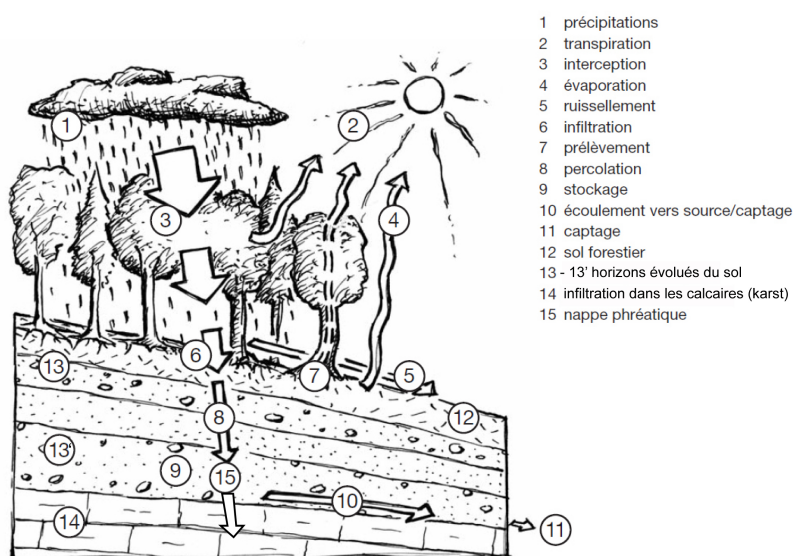


FIGURE 1.4 – Les transferts de l'eau dans le sol [Guide Alpeau 2012]

Le bilan hydrique peut être défini par l'équation suivante :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S) \quad (1.1)$$

Avec P : précipitation liquide ou solide (mm), S : ressources (souterraines, humidité du sol, neige, glace) disponibles à la fin de la période précédente (mm), R : ruissellement de surface et écoulements souterrains (mm), E : évaporation et évapotranspiration, $S \pm \Delta S$: ressources accumulées à la fin de la période étudiée (mm).

L'épikarst

L'épikarst correspond à la zone superficielle du système karstique. D'une épaisseur comprise entre 5 et 30 m [Williams 2008], l'épikarst représente une zone de décompression très fracturée liée à un relâchement des contraintes tectoniques lors de la mise en place des terrains. Cette zone décomprimée permet une dissolution préférentielle le long des fractures des carbonates [Mangin 1975]. L'épikarst est une zone qui permet de stocker et de répartir les infiltrations [Jeannin 2007] entre les écoulements rapides (drain) et lents (volume de roches fissurées et peu perméables).

Cette zone a un rôle de tampon par stockage temporaire ou en permettant un retard dans l'infiltration.

La proximité de l'épikarst avec le sol peut entraîner une influence sur le chimisme de l'eau [Blavoux et Mudry 1986, Bakalowicz 1995, Blondel 2008]. L'activité biologique est importante ce qui permet le développement racinaire. Le dégagement de CO₂ est élevé, l'eau d'infiltration est donc très agressive et une partie importante de l'acquisition du chimisme de l'eau se fait à ce niveau [Guyot 1985]. De plus, il peut se produire des phénomènes de reconcentration des éléments dissous suite à l'évapotranspiration, ou la solubilisation de la matière organique du sol en fonction de leurs états de saturation.

La zone non saturée

Située sous l'épikarst, la zone non saturée est appelée aussi, zone d'infiltration. Pouvant atteindre des centaines de mètres d'épaisseur, cette zone a un rôle majeur, intermédiaire entre la zone d'infiltration épikarstique et la zone noyée. La zone non saturée possède donc une double fonction, à la fois transmissive et capacitive.

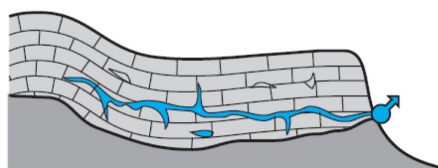
La **fonction transmissive** se distingue par deux modes d'écoulements :

- ◊ les écoulements lents ou diffus par le biais des réseaux de fissures permettant un retard d'infiltration ;
- ◊ les écoulements directs et rapides à travers des fractures drainantes ou directement par des drains karstiques.

La **fonction capacitive** peut être relativement importante en fonction des systèmes karstiques. Les temps de séjours peuvent être longs et permettre un soutien important lors de l'étiage de karsts spécifiques [Emblanch *et al.* 1998]. Certains compartiments de la zone non saturée peuvent fonctionner en trop plein et ne sont activés que par des fortes pluies efficaces [Peyraude 2011].

La Zone Noyée :

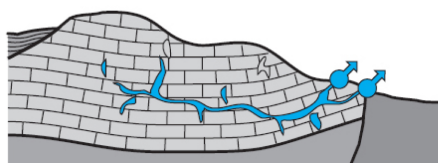
Le zone noyée ou encore appelée zone saturée représente le réservoir principal en eau de l'aquifère karstique. Sa fonction première est d'assurer le stockage de l'eau. La fonction transmissive de l'aquifère est assurée par des drains principalement horizontaux dans lesquels les écoulements sont turbulents. Autour de ces drains existent des réseaux de fissures qui permettent un écoulement lent. C'est dans cette zone que se concentre tous les résidus du pouvoir de dissolution des eaux qui n'ont pas été consommés dans l'épikarst et dans la zone de transmission [Peyraude 2011]. En fonction de leurs formations originelles les drains, qui ont pour finalité l'exutoire du système, peuvent se développer dans la partie supérieure du karst noyé (karst jurassien (Figure 1.5a)) ou encore dans la partie inférieure, sous le niveau de l'exutoire (karst vauclusien (Figure 1.5b)).



a. *Système jurassien*

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une faible résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire.



b. *Système vaclusien*

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une forte résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise sous le niveau de l'exutoire.

FIGURE 1.5 – Représentation d'un système de type jurassien (a) et vaclusien (b) [Marsaud 1997]

NB : Il existe un cas différent de ces deux types de karsts. Il s'agit d'un système karstique où le processus de karstification n'a pas été suffisant pour organiser un réseau de drainage. Les écoulements au sein du système sont alors comparables à ceux d'un système fissuré. L'absence d'organisation des écoulements peut se traduire par un exutoire principal individualisé mais aussi par un nombre important de petites sources [Peyraude 2011].

1.4 Fonctionnement des systèmes karstiques

Mangin [1975] propose un schéma général pour illustrer le fonctionnement des systèmes karstiques (Figure 1.6). Il représente deux types de compartiment : une zone non saturée ou encore appelée système d'infiltration et une zone où le karst est noyé.

Le système d'infiltration se caractérise par la présence ou non d'un aquifère épikarstique. Il se compose de roches altérées et fissurées qui déterminent l'infiltration retardée. La zone non saturée présente surtout deux types d'écoulement : l'infiltration rapide où les écoulements dans des fractures de grandes tailles sont dits monophasiques et l'infiltration lente où les écoulements dans des fissures étroites sont diphasiques. Ces deux types d'écoulement peuvent converger vers des zones de ruissellements souterrains ou se propager directement dans la zone noyée.

Dans la zone noyée de l'ensemble du système karstique tend à s'établir deux structures : un axe de drainage (ou drain) et des systèmes annexes de drainage. L'axe de drainage est un ensemble de conduits souterrains où les écoulements sont définis comme turbulents et rapides (plusieurs mètres par seconde). Dans l'ensemble du système hétérogène, cet axe peut correspondre à une porosité de 0.5% [Marsaud 1997] et a un rôle transmissif au sein du karst. Le système annexe au drainage est représenté par un ensemble de vides anastomosés situé de part et d'autre du drain. Les vides sont tous individualisés et indépendants, la porosité que constitue ces vides dans le système karstique pourrait être estimée à 20% [Marsaud 1997]. Les systèmes annexes au drainage ont un rôle capacitif, ils servent de soutien aux drains en pé-

riode d'étéage.

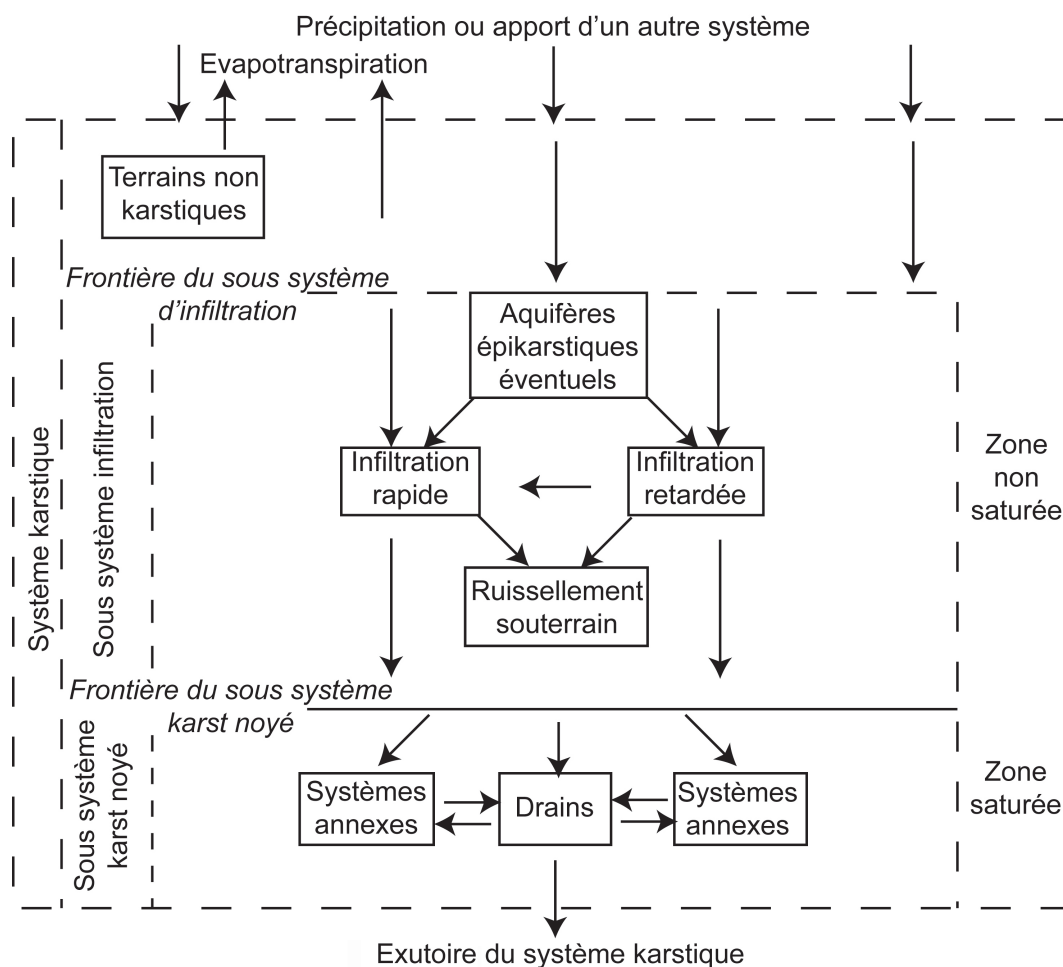


FIGURE 1.6 – Schéma du fonctionnement général des karsts [Mangin, 1975]

NB : de nombreux schémas fonctionnels ont été proposés au cours des années [Bèzes 1976, Lastennet *et al.* 1995, Emblanch *et al.* 2006], toutefois la représentation de Mangin de 1975 (Figure 1.6) est une des plus simples et des plus complètes.

1.5 Formation et caractérisation des constituants de la couverture pédologique

Le sol peut jouer un rôle de filtre naturel, il possède un pouvoir épurateur sur l'eau. Cependant, il est important de connaître ses constituants pédologiques afin de déterminer ceux qui possèdent une solubilité suffisante pour être retrouvés à l'exutoire des sources karstiques. Comprendre la structure permet d'identifier les phénomènes d'adsorption/désorption, de complexation et chélation avec d'éventuels polluants. Pour cela, il est nécessaire d'examiner les processus de formation des sols.

1.5.1 La genèse des sols

La genèse d'un sol appelée pédogenèse est un processus long et complexe, elle peut toutefois se résumer en trois étapes :

1er stade : la décomposition de la roche mère

La roche mère subit une désagrégation physique (fragmentation de la roche) et chimique (transformation des minéraux de la roche). La désagrégation physique se produit sous l'action des écarts de température, de l'effet abrasif par le vent et aussi de l'écartement par le gel et par la poussée des racines. Ces mécanismes permettent la formation d'un "squelette" composé de cailloux, graviers, sables grossiers et fins ainsi que des limons. La taille des produits finaux sera fonction du temps. L'altération chimique consiste en une dissolution de la roche ainsi qu'en une hydrolyse sous l'action de l'eau associée à des acides ou des bases. Ce type de processus permet la formation d'un complexe d'altération comprenant des argiles, de la silice, des oxydes de fer, etc...

2e stade : l'enrichissement en matière organique

Les végétaux pionniers (végétaux supérieurs, champignons, lichens, algues, etc..) suivis des premiers animaux (vers, insectes, etc...) colonisent le sol encore peu épais. A la mort de cette faune et flore, des microorganismes les décomposent pour former de l'humus et permettre un dégazage de CO_2 . Ces deux éléments étant acides, l'altération des minéraux se poursuit. Ces derniers sont donc rendus assimilables pour la nutrition des plantes. Le sol est formé et son profil est homogène, il est dit "jeune" ou "non évolué".

Principe d'humification

L'humification est le processus de transformation de la matière organique fraîche en humus suite à une fragmentation et une digestion réalisées par des décomposeurs (Figure 1.7). Les microorganismes hétérotrophes décomposeurs des matières organiques exogènes se développent par succession de populations en fonction de la nature du substrat [McMahon *et al.* 2005]. La genèse de l'humus s'accompagne d'une fixation d'azote. Toutefois une partie de la matière fraîche est minéralisée par l'action de champignons et de bactéries.

3e stade : les migrations et accumulations différenciant les couches ou les horizons

L'eau d'infiltration peut lessiver et entraîner en profondeur des éléments solubles ou fluides. Le lessivage est dépendant de la pluviométrie, de la perméabilité du sol et de nature de l'humus formé. Ces lessivages font évoluer les couches du sol. Les couches sont appelées horizon, elles sont homogènes et parallèles à la surface. L'horizon se décrit en fonction de son épaisseur, de sa composition granulométrique (argiles, limons, sables, cailloux), de son degré d'altération de la roche mère, de son acidité, ...

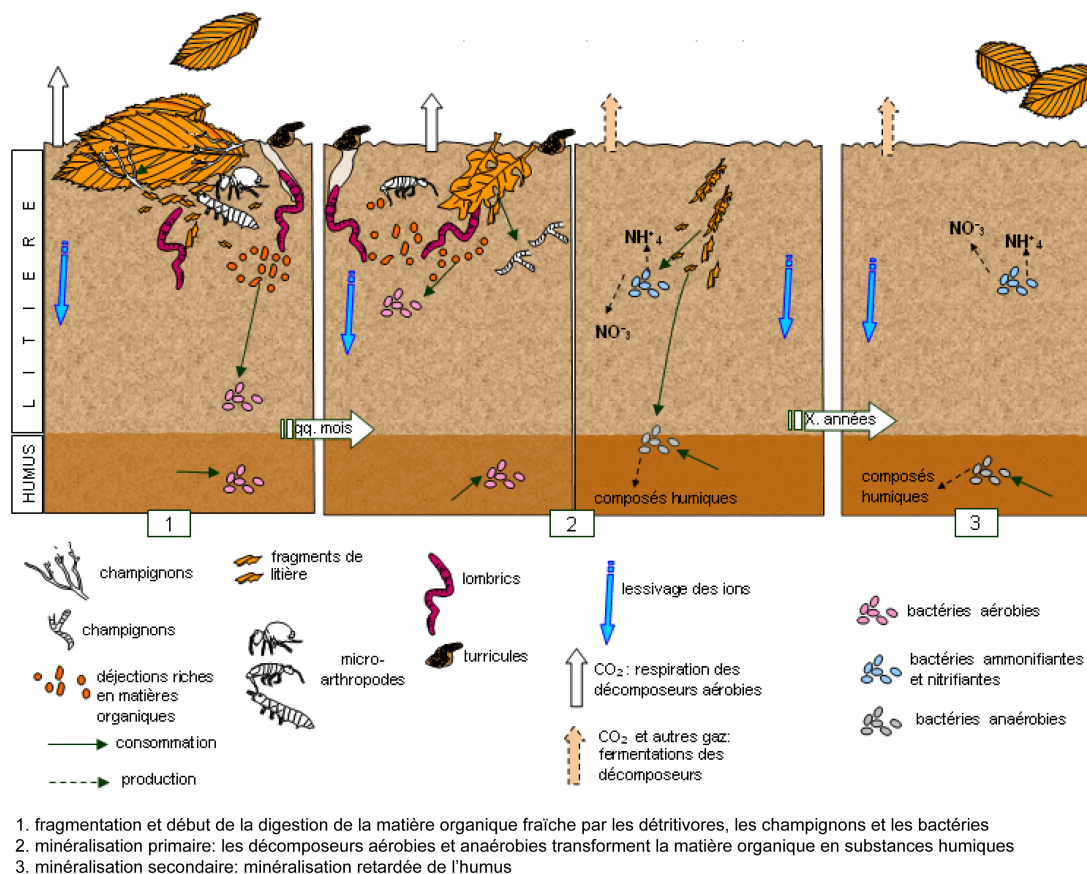


FIGURE 1.7 – Principe d'humification [d'après Gallien]

Classiquement, les horizons sont définis de O à C, ils ne sont pas toujours tous présents. Néanmoins, les principaux horizons retrouvés sont :

O - comprenant la litière et les matières organiques en cours de transformation.

OL - la litière qui comprend l'ensemble des débris bruts (restes de bois, de feuilles et de fleurs fanées).

OF - l'horizon de fragmentation.

OH - l'horizon humifié, composé presque exclusivement de matière organique morte transformée par les organismes du sol.

A - l'horizon mixte composé d'éléments minéraux et d'humus. Sa structure dépend de l'incorporation plus ou moins rapide de l'humus.

E - l'horizon lessivé drainé par l'eau qui s'infiltre, le rendant pauvre en ions, en argiles, en composés humiques et en hydroxydes de fer et d'aluminium.

B - l'horizon d'accumulation apparaissant dans les sols lessivés. Il est riche en éléments fins ou amorphes (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium, humus).

S - l'horizon d'altération. Il est le siège de processus physico-chimiques et biochimiques aboutissant à la destruction des minéraux du sol (altération minérale)

C - la roche-mère peu altérée.

R - la roche-mère non altérée qui correspond à la couche géologique dans laquelle se sont formés les sols.

Pour résumer, les constituants organiques retrouvés dans l'horizon humifère ont deux principales origines :

- ◊ **les constituants vivants** représentés par les végétaux, les animaux du sol et la biomasse microbienne ;

- ◊ **les constituants non vivants** caractérisés par les matières organiques particulaires composées de débris plus ou moins grossiers et les matières organiques moléculaires. Dans cette dernière sous catégorie sont distinguées les substances humiques et les substances non humiques. Nous insisterons plus précisément sur ces deux substances dans la suite du travail de thèse.

1.5.2 Les constituants de la couverture pédologique

1.5.2.1 Les matières humiques

Les substances humiques sont probablement les constituants du sol les moins bien connus malgré le très grand nombre de travaux qui leur sont consacrés [Khan et Schnitzer 1972, Stevenson 1982, Schnitzer 1999, Hayes et Clapp 2001]. La définition des substances humiques reste très vague, selon Stevenson en 1982, elles sont définies comme des substances de masse moléculaire relativement élevée de couleur brune noire et formées au cours de réactions de synthèse dans le sol. Cependant Aiken [1985], les considère comme des substances naturelles d'origine biologique, hétérogènes de couleur jaune à noire et résistante à la dégradation. Griffith & Schnitzer [1975] estiment que les substances humiques représentent 60 à 70% du carbone organique du sol. Malgré ces différentes définitions, il est possible par extraction (Figure 1.8) de différencier trois types de composé. La substance humique est composée d'acide fulvique soluble en milieux alcalins et acides, d'acide humique soluble dans les milieux alcalins et insoluble dans les milieux acides et enfin de l'humine insoluble dans les milieux alcalins et acides. La séparation à l'éthanol des acides humiques permet d'obtenir une phase soluble : les acides hymatomélaniques.

La différence entre les acides fulviques et humiques reste très difficile à déterminer : les premiers étant considérés comme plus mobiles, possédant un plus faible poids moléculaire et donc moins « polymérisés » que les seconds. Les humines correspondent à la fraction des substances humiques insolubles. Bien que peu connues, puisqu'elles sont difficiles à isoler totalement du fait des relations très étroites qu'elles peuvent avoir avec les matériaux inorganiques, elles représentent plus de 50% du carbone organique total du sol.

La composition des substances humiques est définie par les teneurs en éléments chimiques et en groupes fonctionnels. Les substances humiques possèdent une charge toujours négative ou nulle, d'intensité variable suivant le pH du milieu [Ndira 2006]. Cette charge provient de la dissociation des groupements fonctionnels représentés par des groupements fonctionnels hydrophiles : carboxyles (COOH), phénoliques et/ou alcooliques (OH), carbonyles (C=O) ainsi que des groupements amines (NH₂) [Ndira 2006]. Les propriétés physiques des substances humiques sont dues aux groupes COOH et OH. La proportion des groupements COOH est le plus souvent supérieure à 50% [Citeau 2004].

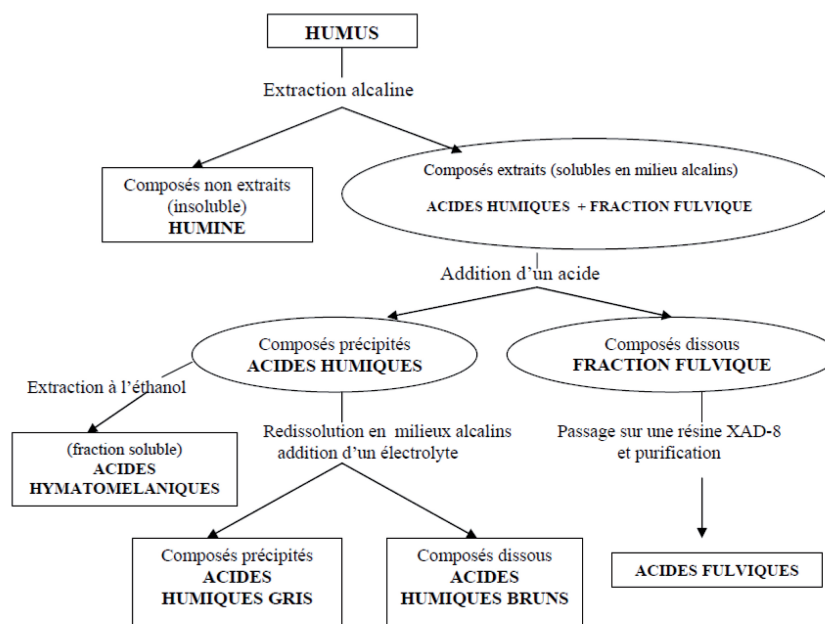


FIGURE 1.8 – Schéma d'extraction et de fractionnement de substances humiques. Composition et structures [Ndira 2006]

Trois caractéristiques fondamentales [Calvet 2003] définissent la conception des substances humiques :

- ◊ il est vraisemblablement impossible de trouver deux molécules de substance humique identiques, qu'elles que soient la taille [Dubach *et al.* 1964] ;
- ◊ il n'existe pas de régularité dans la structure moléculaire des substances humiques [Stevenson 1982] ;
- ◊ les substances humiques sont probablement formées de manière chaotique [Swaby et Ladd 1962].

Ces trois caractéristiques exposent la complexité de représenter de façon conceptuelle les substances humiques.

Actuellement, les substances humiques sont définies comme des "supramolécules" [piccolo *et al.* 1996]. Elles seraient caractérisées par des associations de petites molécules issues de la complexation des débris végétaux et liées entre elles par des liaisons hydrophobes, hydrophiles et de Vander waal, etc... [Piccolo 2001, Sutton et Sposito 2005]. Une représentation d'Andreux et Munier-Lamy [1994] compare la structure des substances humiques et des substances fulviques (Figure 1.9). Les deux substances sont représentées avec un noyau central aromatique sur lequel sont fixées des chaînes latérales aliphatiques ramifiées, mais plus longues pour les substances fulviques. Le noyau aromatique et les chaînes aliphatiques sont deux structures qui permettent la fluorescence.

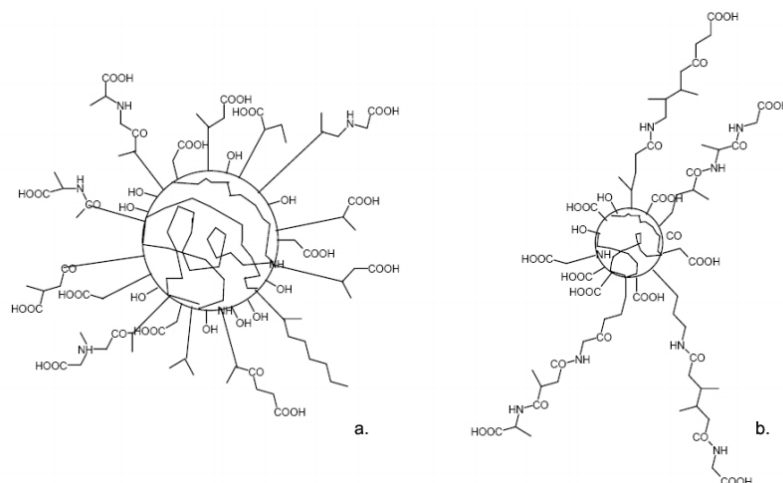


FIGURE 1.9 – Modèle de structure des substances (a) humiques (b) fulvique [Andreux et Munier-Lamy 1994]

1.5.2.2 Les matières non humiques

Les sols contiennent une grande variété de composés organiques qui existent à l'état libre pour une petite partie. Pour la majorité, les composés organiques sont soit associés aux colloïdes humiques et minéraux, soit des constituants des substances humiques [Calvet 2003]. Les substances non humiques sont des molécules appartenant à des familles chimiques identifiées en trois groupes : les composés azotés, les hydrates de carbone et les lipides [Calvet 2003].

Les composés azotés :

Ce sont les acides aminés, les sucres aminés, les acides nucléiques et un certain nombre de pigments et leur dégradation. Les deux premiers groupes sont quantitativement les plus importants.

Acides aminés :

Ce sont des molécules qui possèdent au moins une fonction carboxylique et une fonction aminée. Les acides aminés les plus abondants dans le sol sont ceux des parois cellulaires des micro-organismes, notamment la glycine, l'alanine, l'acide aspartique et l'acide glutamique. Les substances humiques contiennent les mêmes acides aminés [Calvet 2003]. Plusieurs facteurs ont une influence sur leur quantité et leur distribution dans les sols : les réactions de synthèse et de dégradation, les organismes vivants, l'adsorption et les réactions chimiques avec les quinones et les sucres. Les plus caractéristiques pour l'étude sont les composés aromatiques monoacides monoaminés, à savoir la phénylalanine, la tyrosine et le tryptophane (Figure 1.10).

Les sucres aminés :

Ce sont des mucopolysaccharides que l'on trouve dans le sol, combinés, entre autre, avec des mucopeptides et des mucoprotéines. Certains sont des polysaccharides insolubles en milieu alcalin et sont appelés "chitines". Les sucres aminés représentent 5 à 10% de l'azote des couches de surface du sol [Stevenson 1994]. Leur

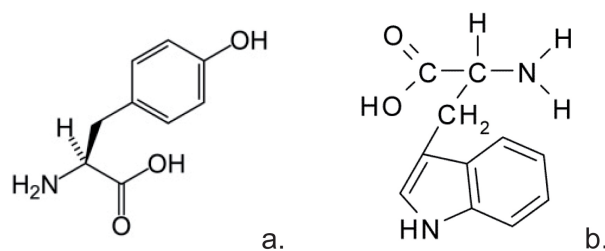


FIGURE 1.10 – Structure des acides aminés (a) Tyrosine (b) Tryptophane

structure est de type noyau pyrane où un radical hydroxyle est remplacé par une fonction amine.

Les hydrates de carbone :

Les hydrates de carbone ou carbohydrates sont des composés très répandus, ils représentent 5 à 25% de la matière organique du sol et proviennent des résidus des parois cellulaires des végétaux et des synthèses microbiennes qui sont leur principale source [Stevenson 1994]. Ils tirent leur nom de leur formule chimique générale $C_n(H_2O)_m$ (Figure 1.12) et peuvent se présenter sous la forme d'un simple monosaccharide (hexoses, pentoses) ou sous la forme de polysaccharides comme la cellulose (Figure 1.11) ou l'hémicellulose correspondant à des monosaccharides liés par des liaisons glucosidiques β -(1-4) (Figure 1.13).

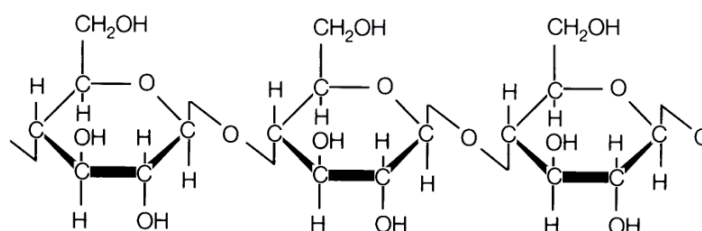


FIGURE 1.11 – Structure de la cellulose

La lignine :

C'est une macromolécule de haut poids moléculaire qui compose une partie de la paroi des plantes ligneuses et permet la rigidité, des ptéridophytes (fougères) et certaines bryophytes (mousses). La structure des lignines est polyaromatique comprenant trois unités de bases, (i) l'alcool coumarylique, (ii) l'alcool coniférylique et (iii) l'alcool sinapylique (Figure 1.12).

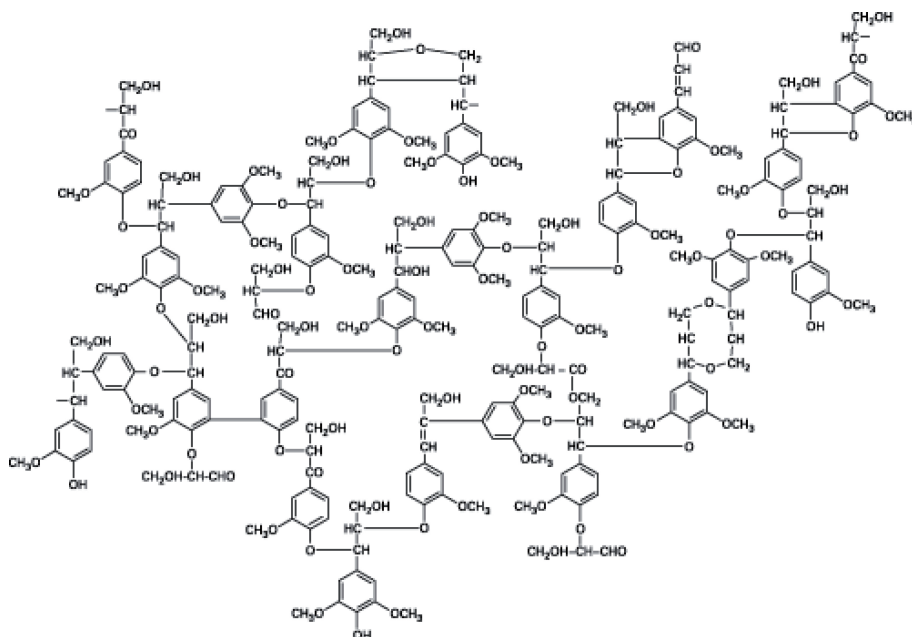


FIGURE 1.12 – Structure de la lignine

Les tanins :

Les tanins sont des substances d'origine végétale, non azotée. Ils se distinguent par une famille hydrolysable et une famille non-hydrolysable ou condensée (ou encore proanthocyanidine). Les tannins condensés, polymères de proanthocyanidine, sont des polyphénols tandis que les tannins hydrolysables ont deux unités de base, un sucre estérifié soit par l'acide gallique soit par l'acide ellagique.

Les lipides :

Ils correspondent à un ensemble de composés organiques solubles dans des solvants organiques [Dinel *et al.* 1990]. Ce terme regroupe des composés très variés, allant des simples composés comme les acides gras à des molécules complexes comme les stérols, les terpènes ou encore des substances tels que les corps gras, les cires et les résines. Ils proviennent des résidus de végétaux et des microorganismes et ne représentent que 2 à 6% de la matière organique du sol. Les lipides peuvent avoir des conséquences sur les propriétés physiques du sol, à savoir jouer un rôle sur l'agrégation du sol et sa stabilité ainsi que la rétention de l'eau. Les lipides sont considérés comme résistants à la biodégradation. Les principaux constituants des lipides sont : les cires, les hydrocarbures et en particulier les composés polycycliques aromatiques les acides gras, etc ...[Schnitzer and Neyroud 1975].

2 Le karst, un milieu vulnérable

2.1 Notion de vulnérabilité appliquée au karst

La notion de vulnérabilité a été définie dans les années 60-70, comme la possibilité de transit par un trajet vertical de corps polluant depuis le sol de surface jusqu'au réservoir aquifère [Margat 1968, Albinet and Margat 1970]. Cette propagation possède une vitesse variable selon les caractéristiques de la roche aquifère,

de l'épaisseur du sol et de la zone non saturée et saturée ainsi que de la "pente" hydraulique. Cette notion de vulnérabilité se subdivise en deux catégories : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique.

La **vulnérabilité intrinsèque** est définie comme dépendante des propriétés du karst lui même. Le degré de vulnérabilité repose sur la quantité de recharge en eau, les propriétés du sol de surface (dans le cas où il est présent) et sur les caractéristiques des zones saturées et non saturées. Quinlan *et al.* [1991] ajoutent les caractéristiques des infiltrations. Elles ont un faible impact dans le cas où elles sont diffuses et spatialisées sur le bassin d'alimentation, mais sont très impactantes lorsqu'elles sont ponctuelles et directes. Ils insistent également sur l'importance du degré d'évolution de l'épikarst. Les mesures directes des paramètres de la vulnérabilité intrinsèque sont donc difficiles [Gogu and Dassargue 1998].

La **vulnérabilité spécifique** est définie comme la vulnérabilité d'un aquifère à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Cette vulnérabilité prend en compte la structure de l'aquifère ainsi que la propriété du polluant. En effet, le potentiel agressif du contaminant peut être affecté par des processus de retard ou de désintégration comme la sorption, la biodégradation, la filtration, etc [Sinreich *et al.* 2004, Vernoux and Buchet 2010]. La notion de vulnérabilité spécifique à l'occupation des sols est souvent associée aux activités humaines et à la couverture pédologique [Vrba and Zaporozec 1991].

2.2 Etudes de la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques

L'étude de la vulnérabilité des eaux souterraines des systèmes karstiques peut être réalisée à partir des méthodes dites à index. Elles sont basées sur la superposition spatiale de plusieurs critères influençant la vulnérabilité de la région d'étude. Une valeur numérique est imposé en fonction du degré de vulnérabilité du critère et chaque critère possède une pondération en fonction de son importance.

La réalisation de cartes multicritères a débuté aux Etats Unis [Aller *et al.* 1987] avec une méthode appelée **DRASTIC** (**D**epth to water, **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of the vadose zone and hydraulic **C**onductivity). Cette méthode avait pour but d'estimer la sensibilité à la pollution potentielle des eaux souterraines sur des grandes zones. Chaque paramètre est cartographié avec un index numéroté de 1 à 10 et un facteur de pondération est appliqué aux différents paramètres en fonction de leur importance. L'index de vulnérabilité (D_i) correspond à la somme des 7 paramètres (j) selon la formule suivante :

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=7} (W_j R_j) \quad (1.2)$$

Avec : D_i , l'index de vulnérabilité global d'une unité cartographique ; W_j , le facteur de pondération du paramètre j et R_j , l'index du paramètre j .

Dérivée de DRASTIC, la méthode italienne **SINTACS** (**S**oggiacenza, **I**nfiltrazione, **A**zione del **N**on Saturo, **T**ipologia della Copertura, **C**aratteri idrogeologici dell' **A**cquifero Conducticibilità, et Acclività della **S**uperficie) a été conçue de plus petites zones. Les différences principales avec la méthode DRASTIC sont les valeurs des index, la sélection des classes de pondération et la stratégie de leur combinaison [Dörfliger *et al.* 2004]. La méthode SINTACS utilise les mêmes paramètres que DRASTIC mais est plus souple au niveau du système d'indexation et de pondération. L'index de vulnérabilité I_v est calculé selon la formule suivante :

$$I_v = \sum (P_{1,7} W_{1,n}) \quad (1.3)$$

Avec : $P_{1,7}$, l'index des paramètres 1 à 7 et $W_{1,n}$, le poids correspondant à chaque classe.

Dans le but de protéger les eaux souterraines karstiques, l'**OFEFP** (**O**ffice **F**édérale de l'**E**nvironnement, de la **F**orêt et le **P**aysage **H**elvétique) avec la participation du projet suisse COST Action 65 (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) a permis l'élaboration de la méthode EPIK [Dörfliger 1996]. Le nom **EPIK** est issu de l'acronyme **E**pikarst, couverture **P**rotectrice, condition d'**I**nfiltration et développement du réseau **K**arstique. Cette méthode est basée sur l'organisation spécifique des écoulements dans le milieu karstique. Elle consiste en l'évaluation, le levé cartographique et la combinaison de quatre critères, à savoir le développement de l'épikarst, l'épaisseur de la couverture protectrice, les conditions d'infiltration et le développement du réseau karstique. Cette méthode permet d'évaluer la sensibilité des eaux souterraines en milieu karstique.

Chaque paramètre est divisé en classe traduisant des degrés d'impact vis à vis d'une pollution et chaque paramètre possède un coefficient de pondération qui est fonction de son importance. L'indice final de vulnérabilité est calculé selon la formule suivante :

$$F = \alpha E_i + \beta P_j + \gamma I_k + \delta K_l \quad (1.4)$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta$, les coefficients de pondération de chacun des critères, et E_i, P_j, I_k, K_l , les valeurs de chacun des critères indexés.

De cette méthode a découlé la méthode multicritère **RISKE** [Peletier-Giraud *et al.* 2001]. Elle prend en compte 5 critères qui permettent de définir l'architecture de l'aquifère et l'organisation des écoulements dans le milieu karstique. Les critères sont : la **R**oche aquifère, l'**I**nfiltration, le **S**ol, la **K**arstification et l'**E**pikarst. Elle a pour but d'évaluer la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. L'indice global de vulnérabilité I_g se détermine selon la formule suivante :

$$I_g = \alpha R_i + \beta I_j + \gamma S_k + \delta K_l + \epsilon E_m \quad (1.5)$$

Avec : $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$, les poids des critères, et i, j, k, l, m , les indices des critères.

Une méthode intermédiaire, en 2005, RISKE2 (s’inspirant de EPIK et de RISKE) fût créée avant d’aboutir à une dernière version appelée PaPRIKa [Döerfliger and Plagnes 2009]. L’acronyme **PaPRIKa** signifie "**P**rotection des **a**quifères karstiques basée sur la **P**rotection, le **R**éservoir, l’**I**nfiltration et le degré de **K**arstification". Elle correspond à une méthode multicritère à index avec système de pondération dont les critères sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques [Döerfliger and Plagnes 2009]. Cette méthode a été appliquée, dans le cadre de cette thèse, à des petits systèmes karstiques de moyenne montagne, sa description complète est détaillée Chapitre 5.

Actuellement, des méthodes dérivées de PaPRIKA sont développées pour être appliquées à des milieux plus spécifiques. C’est le cas de la méthode **PPLIK** (**P**récipitation, couverture **P**rotectrice, **I**nfiltration, **L**ithologie et **K**arstification) qui a été conçue pour définir la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques Nord africains [Tayebi 2011].

A la suite du projet Action COST 65, l’action COST 620 fût créée en 1997 dans le but d’établir une méthodologie pour la réalisation de carte de vulnérabilité spécifique et intrinsèque. Plusieurs méthodes ont été aussi développées à l’issue de ce projet.

- ◊ La méthode **PI** [Goldscheider *et al.* 2000] basée sur la caractérisation spatiale de deux critères : P pour la couverture **P**rotectrice (5 critères) et I pour les conditions d’**I**nfiltration (1 critère).

- ◊ La méthode LEA se présente comme la méthode PI mais sans recours à l’usage d’indices numériques.

- ◊ La méthode **COP** [Vías *et al.* 2002] qui permet la caractérisation de la ressource et non d’une source ou d’un captage. C représente la concentration du flux en distinguant la recharge par les pertes et avens de celle du reste du bassin d’alimentation. O caractérise les formations superficielles de couverture résultant du croisement entre l’épaisseur et la nature de la couverture. Enfin, P détermine les précipitations obtenues en croisant les quantités et intensités.

Cette méthode a évolué vers la méthode **VUKA** (**V**ulnerability mapping in **K**Arst terrains) appliquée aux terrains karstiques Sud africains [Leyland and Wirthüser 2010].

Pranville *et al.* [2007] a réalisé une comparaison entre les principales méthodes de réalisation de carte de vulnérabilité. Pour réaliser cette étude, le Causse de Gramat a été retenu. Il appartient au Causse de Quercy situé en marge sud-ouest du Massif Central. L’auteur met en évidence que les plages de vulnérabilité sur le bassin d’alimentation sont très variables d’une méthode à l’autre (Figure 1.13). En complément, il montre que :

- ◊ la définition des classes des pentes diffèrent d’une méthode à l’autre ;
- ◊ des redondances existent dans les critères ;
- ◊ le reclassement des valeurs d’indice peut être en contradiction avec les observations de terrain ;
- ◊ le système de pondération ne laisse pas toujours assez de souplesse pour faire jouer les différents paramètres ;

◇ la fracturation verticale n'est pas toujours prise en compte.

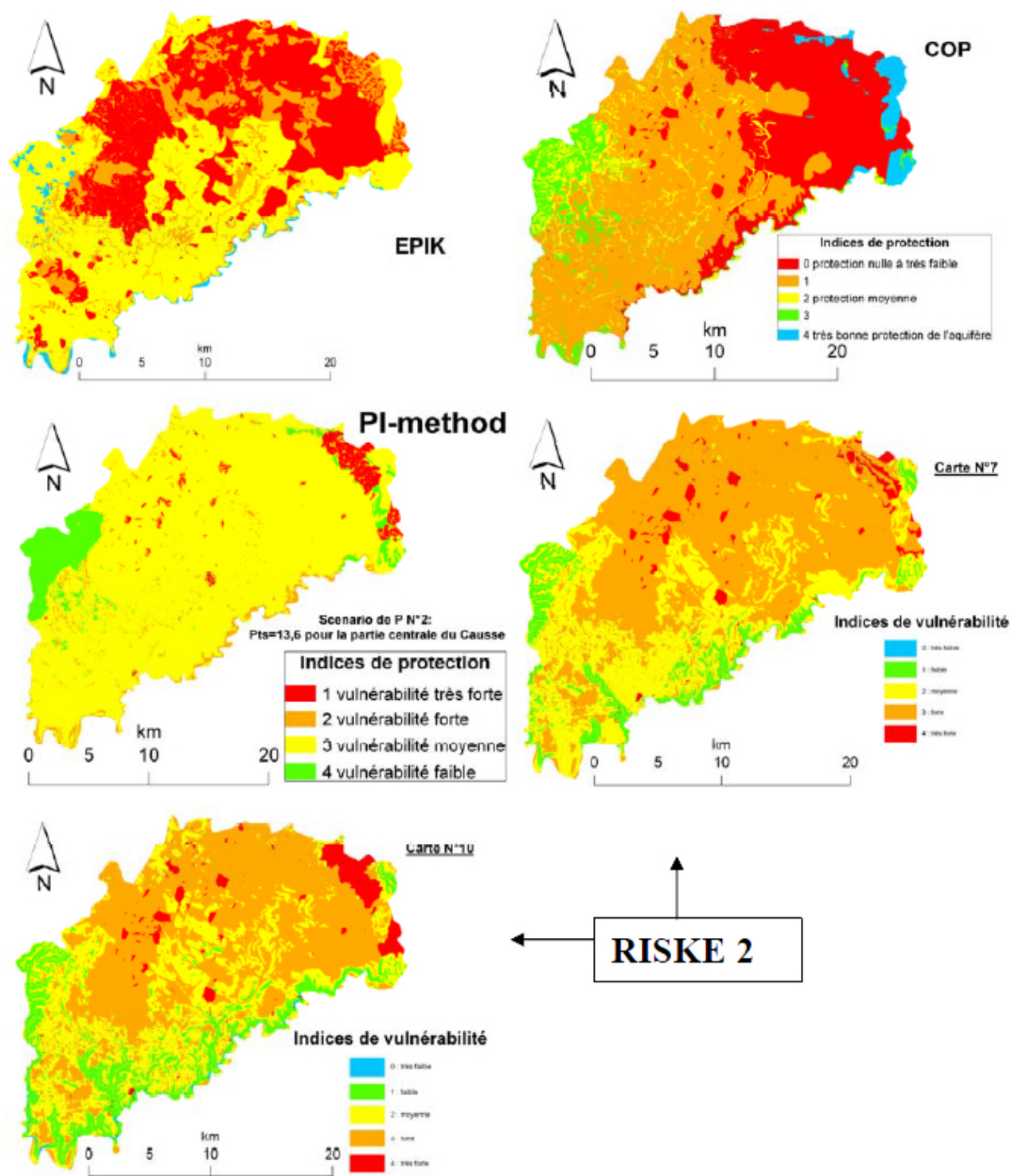


FIGURE 1.13 – Comparaison entre les principales méthodes de cartographie de la vulnérabilité (EPIK, COP, PI, RISKE) des bassins versants de systèmes karstiques appliquées sur le causse de Quercy [Pranville 2007]

2.3 la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques

Les études sur la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques sont plus compliquées à mettre en place. Elles sont généralement réalisées lors d'études d'impacts pendant l'aménagement d'un site ou encore après l'apparition d'une pollution. Les contaminations peuvent être multiples, d'origine animale ou anthropique. La vulnérabilité peut prendre en compte une pollution diffuse et/ou ponctuelle :

La pollution diffuse :

Elle résulte d'une contamination rendant impropre la qualité des eaux, causée par des rejets diffus affectant une partie ou toute la surface du bassin d'alimentation. Sous l'influence des précipitations, cette pollution est transmise à l'aquifère en traversant le sol. Au sein des systèmes karstiques, il s'agit généralement d'un type de pollution qui influence la qualité de l'eau de la source de manière rémanente ou permanente. En milieu forestier, cette "pollution" correspond majoritairement à une contamination naturelle par des matières dissoutes ou en suspension composées de matières organiques et minérales. Elle se traduit par une augmentation de la turbidité ainsi que des nitrates, et par la présence occasionnelle de bactéries fécales (*Escherichia Coli* et *Enterocoque*) [Dorioz *et al.* 2008].

La pollution ponctuelle :

Elle correspond à une contamination qui peut être localisée géographiquement. Cette pollution n'est pas permanente, et souvent d'origine accidentelle. En période d'étiage, certains flux entrant comme par exemple des rejets de station d'épuration, ne sont plus dilués et la qualité de l'eau peut être fortement impactée par la présence de bactéries fécales [Mahler *et al.* 2000]. Dans les milieux karstiques de moyennes montagnes, les pollutions ponctuelles sont régulièrement associées aux activités sylvicoles, pastorales et touristiques. On peut citer : des pollutions par les hydrocarbures provenant de cuves de restaurant (exemple de la pollution au fuel de la source karstique de Font d'Urle dans le Vercors en 2007), d'engins sylvicoles et d'huiles de chaîne des tronçonneuses, de l'utilisation de produits phytosanitaires pour le traitement des bois [Liu *et al.* 1999], ou encore une augmentation de matières en suspension suite à un remaniement du sol après le passage d'engin.

La vulnérabilité accidentelle bien que fortement impactante peut être relativisée compte tenu des divers limites de contexte de la ressource.

Pour éviter tout type de pollution, la législation française impose, depuis la loi sur l'eau de 1964, une mise en place de périmètres de protection des ressources en eau potable au sein des bassins d'alimentation. Au nombre de trois (Figure 1.14) leur définition doit tenir compte de la complexité de la structure des milieux karstiques. Trois périmètres sont définis :

- ◊ le Périmètre de Protection Immédiate (PPI) est le plus restreint et se présente autour du captage. Il a pour objet la protection des ouvrages, notamment des drains captants ;

- ◊ le Périmètre de Protection Rapprochée (PPR) est mis en place pour prévenir des risques de pollution dans une zone d'infiltration sensible. La taille de ce périmètre est fonction des dimensions du système aquifère et des critères de transfert ;

- ◊ le Périmètre de Protection Eloignée (PPE) n'est pas obligatoire. Sa superficie

devrait correspondre à la zone d'alimentation de la source.

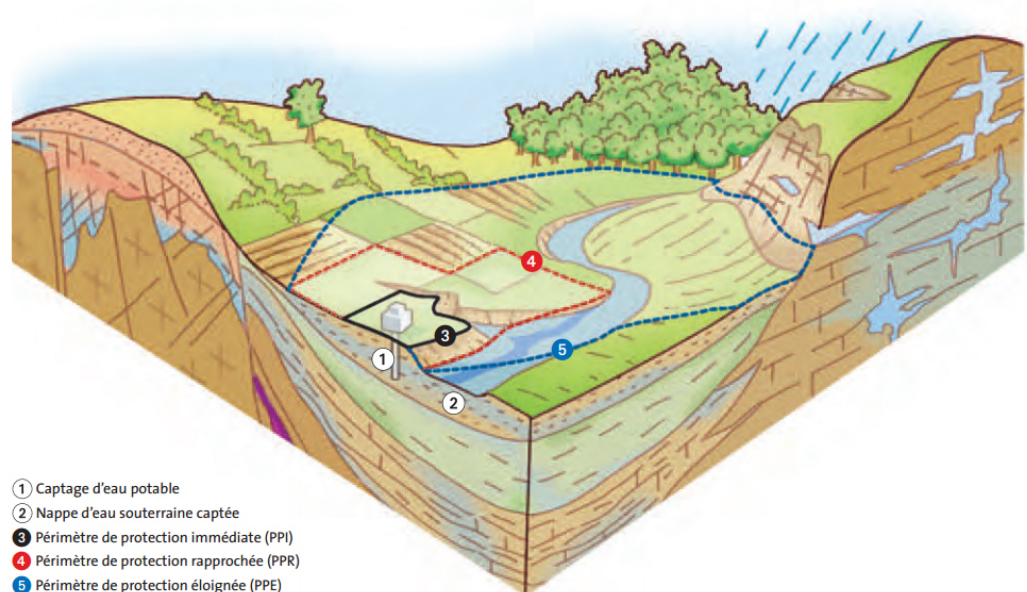


FIGURE 1.14 – Les différents périmètres de protection au sein d'un bassin versant [Vernoux et Buchet 2010]

Bien que ces trois périmètres existent, les ressources en eau des systèmes karstiques restent très vulnérables aux contaminations anthropiques ou naturelles comme une remobilisation du sol suite à un glissement de terrain.

3 Etat des connaissances sur le changement climatique et son impact sur le milieu karstique de moyenne montagne

3.1 Caractérisation de l'évolution climatique dans les Alpes de Savoie

Les Alpes sont soumises à quatre grandes influences climatiques dont l'emprise est plus ou moins importante selon la situation géographique et les saisons. Ces influences sont : les flux d'Ouest qui apportent douceur et humidité (influence atlantique) ; les flux méditerranéens qui amènent chaleur et pluies sur les versants méridionaux (effet de foehn sur les versants Nord) ; les flux de nord issus des hautes latitudes (froid et sec) ; la masse d'air continental à l'Est (froid et sec en hiver et chaud en été) [Livre blanc du climat en Savoie 2010].

3.1.1 La température de l'air

Bien que les causes soient sources de controverse, l'augmentation de la température de l'air est un phénomène mondial avéré. Depuis 1900, l'augmentation de la température est estimée à $+ 0.7^{\circ}\text{C}$ à l'échelle mondiale. Les systèmes montagneux,

comme les Alpes, génèrent leurs propres climats, et la topographie joue un rôle essentiel dans la détermination des climats locaux. Combiné au déplacement des masses d'air, cela favorise l'apparition de microclimats ce qui ne rend pas évident l'estimation de l'impact du changement climatique. Toutefois de nombreux rapports traitant ce sujet ont été réalisés et montrent que de 1901 à 2000 l'augmentation de la température est estimée à $+ 0.9^{\circ}\text{C}$ [Livre blanc du climat en Savoie 2010]. Cette augmentation est beaucoup plus marquée depuis le milieu des années 80, les années les plus chaudes sont 1994, 2000, 2002 et 2003. Les modélisations réalisées sur l'évolution des températures dans les Alpes montrent que d'ici le 21^e siècle, les températures devraient augmenter de 3 à 5°C . De 1980 à 2000, le nombre de jour de gel a diminué de 12 à 14% [ONERC 2008].

Plus localement, l'ensemble des postes de montagne ont enregistré depuis 1950 une augmentation des températures moyennes située entre $+ 1,69^{\circ}\text{C}$ et $+ 1,81^{\circ}\text{C}$ en moyenne (Figure 1.15). Au niveau saisonnier, les étés et les hivers se sont réchauffés de manière similaire en Savoie ($+ 2^{\circ}\text{C}$) avec des pics mensuels pour janvier ($+ 2,5^{\circ}\text{C}$) et août ($+ 2,46^{\circ}\text{C}$), suivis du printemps ($+ 1,78^{\circ}\text{C}$) et de l'automne ($+ 1,17^{\circ}\text{C}$) (Figure 1.15). Depuis 1985, début de l'important réchauffement actuel, c'est la saison printanière qui s'est la plus réchauffée avec $+ 2^{\circ}\text{C}$ [Livre blanc du climat en Savoie 2010] .

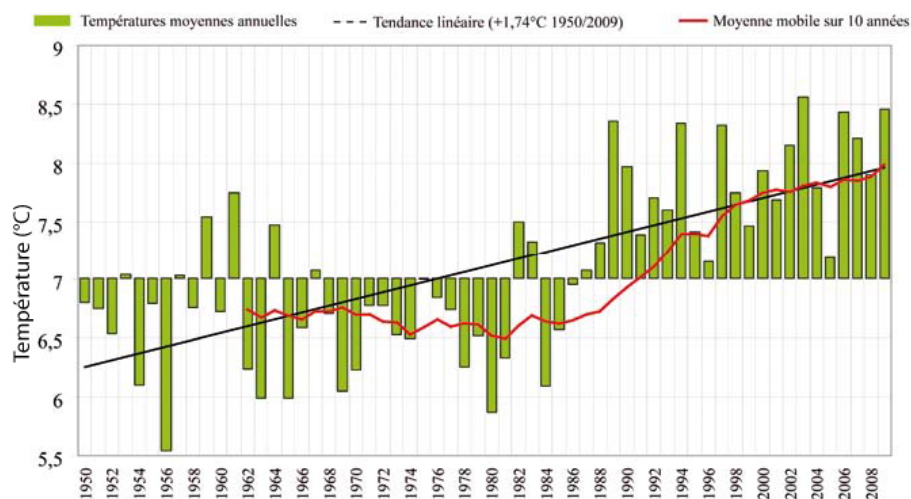


FIGURE 1.15 – Ecart moyen annuel de la température de la montagne savoyarde de 1950 à 2009 par rapport à la normale 1971/2000 [Livre blanc du climat en Savoie 2010]

L'augmentation des températures (liée au CO_2) a aussi un impact sur la végétation. Les forêts montrent des augmentations de croissance de 25 à 50% sur la période 1900-2000 [ONERC 2008], ce qui a pour effet une augmentation de l'évapotranspiration. Cette évapotranspiration est d'autant plus importante que la reprise de la végétation après l'hiver est de plus en plus précoce. L'infiltration efficace des pluies est donc réduite. Dans les zones de montagne, la progression des feuillus sur les conifères a un impact plutôt positif. Les feuillus apportant plus de matières organiques à l'automne lors de la chute des feuilles, les litières forestières sont plus importantes et ont donc un meilleur pouvoir épurateur de l'eau.

3.1.2 Les précipitations

L'évolution des précipitations est beaucoup plus difficile à appréhender. Les analyses ne montrent pas de changements aussi marqués que pour les températures. Toutefois les longues séries (Figure 1.16) mettent en avant une très faible et non significative augmentation des précipitations depuis 1947 [Livre blanc du climat en Savoie 2010].

Très localement en Savoie, des relevés météorologiques font apparaître des baisses dans les cumuls des précipitations de certaines stations isolées [Livre blanc du climat en Savoie 2010]. Les cumuls annuels ne changent pas mais les tendances saisonnières des précipitations se modifient au cours de l'année. Les précipitations sont en baisse sur la période estivale tandis qu'elles augmentent en hiver. Il existe un décalage dans les précipitations, les averses d'été se décalent en automne [ONERC 2008]. Toutefois certains rapports [CIPRA 2007] annoncent qu'au cours de ce siècle, les précipitations devraient diminuer de 1 à 11%, avec une incidence accrue de 36% des sécheresses estivales.

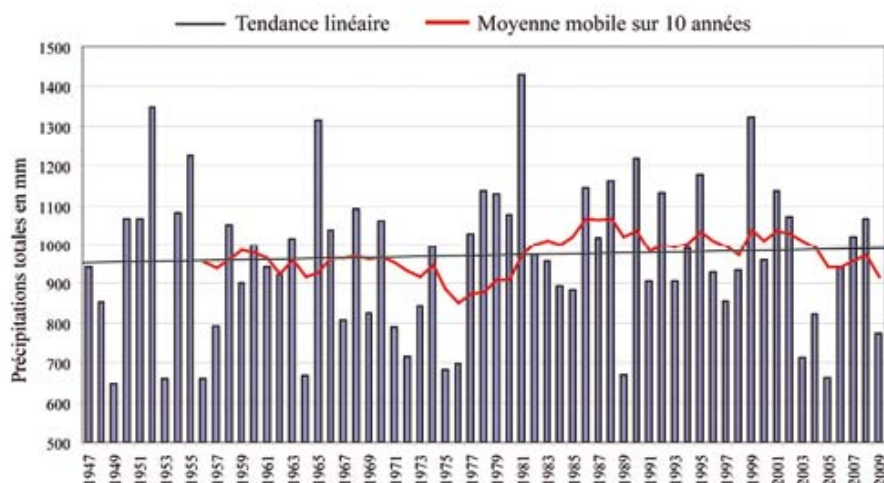


FIGURE 1.16 – Evolution des totaux de précipitations annuelles à Bourg-Saint-Maurice de 1947 à 2009. *Météo-France*

Un point de plus en plus abordé, concerne les intensités des précipitations, que ce soit au niveau de la durée qu'au niveau de la quantité. Des études récentes [Frei *et al.* 2006] tendent à prouver que les intensités des pluies ont augmenté de 10 à 12%. Les événements extrêmes sont donc plus fréquents, ils augmentent donc la probabilité de voir apparaître des inondations.

3.1.3 Le couvert neigeux

L'augmentation des températures associée au décalage des précipitations ont un impact non négligeable sur la couverture neigeuse. Depuis 1960, la durée d'enneigement n'a cessé de baisser, les estimations montrent une perte de 1 mois. Pour des altitudes de 1500m, l'enneigement passe de 5 à 4 mois en moyenne dans les Alpes du Nord. La quantité est aussi en baisse, toujours depuis 1960, il est noté une réduction de l'ordre de 30% (Figure 1.17), soit environ 1 m de neige cumulée [Livre blanc du climat en Savoie 2010]. La hauteur de 1m50 dans les préalpes (étude réalisée dans

le Massif de Bauges et le Massif de la Chatreuse) n'a été dépassée qu'une seule fois depuis 1990, alors que cette valeur était atteinte 3 ou 4 fois par décennie.

Enfin, pour chaque degré d'augmentation de la température, la ligne d'enneigement s'élèvera d'environ 150m et la durée de la couverture neigeuse diminuera de plusieurs semaines [IPCC 2007].

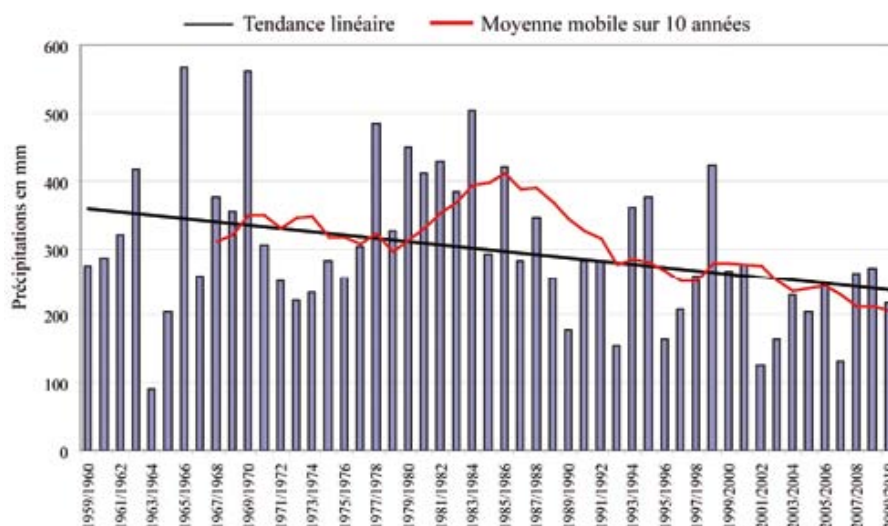


FIGURE 1.17 – Evolution des cumuls de neige fraîche à Peisey-Nancroix de 1959/1960 à 2009/2010. *Météo-France*

3.2 Impacts sur la qualité et la quantité des ressources karstiques en eau

3.2.1 La quantité des ressources en eau

Nous avons donc vu que le cumul annuel des précipitations ne présentait pas d'évolution significative. Les quantités reçues sur le sol restent globalement les mêmes. Toutefois, le décalage saisonnier des précipitations peut avoir un impact important. En effet, les pluies d'été se produisent en automne, or l'été est une période chaude, la demande d'eau est donc importante. Ce manque d'eau peut donc être problématique.

Pour les systèmes de montagne, la couverture neigeuse est un apport nécessaire pour les ressources karstiques. La fonte du stock de neige qui a lieu généralement courant Avril-Mai permet un soutient régulier et diffus jusqu'aux mois de Juin-Juillet. L'épaisseur et la durée de la couverture neigeuse se réduisant, il existe un impact négatif sur la répartition saisonnière des apports en eau.

Le risque le plus important pour la ressource en eau reste d'origine anthropique. La population en Savoie a augmenté de 12% entre 1990 et 1999 (chiffres INSEE). Les quantités d'eau restent inchangées alors que la demande croît. Le problème le plus important sera donc de pouvoir capter et stocker l'eau lors des saisons abondantes

en précipitation pour la redistribuer lors des périodes d'étéage.

Il est à noter aussi que la végétation peut avoir un impact sur la ressource. Avec l'augmentation des températures, l'évapotranspiration plus importante réduit les quantités d'eau s'infiltrant dans le sol. De plus, le changement de végétation sur les versants de montagne avec la propagation des feuillus sur les résineux a aussi un effet néfaste sur la ressource en eau, les feuillus ont une évapotranspiration plus importante que les résineux.

3.2.2 La qualité des ressources en eau

La modification du climat ne joue pas un rôle prépondérant sur la qualité de la ressource en eau. Ce sont principalement les activités anthropiques (agriculture, industries, etc...) qui sont vectrices des pollutions de l'eau.

Cependant, l'augmentation de l'intensité des précipitations peut avoir un effet négatif sur la qualité de l'eau. Des pluies violentes entraînent une remobilisation plus importante des éléments solides du sol. La turbidité qui est un paramètre limitant pour la potabilité des eaux risque de dépasser les normes de façon plus régulière. De plus, le lessivage des sols permet l'apport d'agents pathogènes (*Escherichia coli*, Entérocoques, etc ...) et de champignons.

3.3 Conclusion

L'essentiel des rapports existants traitent de l'impact d'un changement climatique sur les eaux de surface et les nappes aquifères. Le cas des systèmes karstiques n'est que très rarement abordé. D'une part, ces systèmes sont de structures complexes et d'autre part, ils diffèrent d'un faciès géologique à un autre de part leur caractère très transmissif. Les systèmes karstiques peuvent être comparés à des "*pluviomètres naturels*". Toutefois en fonction de leur taille, ils présentent également un caractère capacitif et peuvent réguler le transfert des eaux sur de très longues périodes.

La place du karst dans l'alimentation en eau potable est un enjeu très important dans les milieux de moyenne montagne. Dans un premier temps, pour identifier l'impact des activités anthropiques sur les bassins d'alimentation des bassins, nous avons sélectionnés 5 sites karstiques en milieu forestier. Puis dans un second temps, nous proposons d'évaluer les impacts du changement climatique sur les karsts préalpins et jurassiens. Pour cela, 2 sites possédant des chroniques de données suffisamment longues (plus de 50 ans) et un site avec des séries de données moins longues (30 ans) ont été retenues pour répondre à cette objectif.

Chapitre 2

Contexte général et présentation des sites

En France, le karst représente 35% du territoire [Mangin 1975], ce qui correspond à environ 180 000 km². Ce type d'aquifère fournit plus de 55% de l'eau destinée à l'alimentation en eau potable (AEP). Les systèmes karstiques de montagne sont très importants car ils peuvent représenter l'unique ressource en eau pour l'alimentation des communes. La Figure 2.1 montre la répartition des domaines carbonatés en France. La moyenne montagne (avec une tranche d'altitude de 1000 à 2000 m) en milieu carbonaté est représentée en France par le Jura, les Pyrénées, les préalpes, les Vosges et la Montagne Noire. Dans ces domaines, les aquifères sont généralement peu étendus et la karstification est souvent très développée [Marsaud 1997].

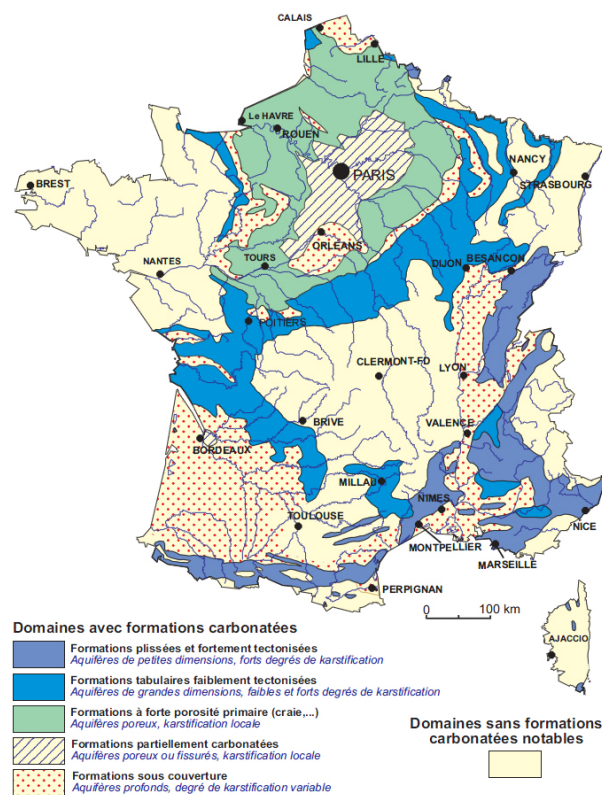


FIGURE 2.1 – Répartition des domaines karstiques en France [Marsaud 1997]

La faible étendue des systèmes karstiques est liée principalement à la géologie de ces domaines, les couches étant fortement tectonisées, plissées et fracturées. La proportion totale de ces karsts de moyennes montagnes représente globalement moins de 7% du territoire Français.

1 Contexte général de la zone d'étude

1.1 Géographie

La zone d'étude est localisée à l'Ouest des pays de Savoie. Elle s'étend sur environ 1600 km² et comprend deux domaines structuraux (Figure 2.2) : les chaines subalpines septentrionales incluant les massifs de la Chartreuse et des Bauges, et le chaînon jurassien de l'Epine - Chat appartenant à l'extrémité méridionale des chaînons du Jura. Ces deux domaines sont séparés par le sillon molassique périalpin.

Les massifs subalpins d'orientation Sud-Ouest – Nord-Est sont formés par une succession d'anticlinaux et synclinaux perchés [Boissier 2005]. Le chaînon jurassien de direction Nord-Sud correspond à un grand anticlinal coffré. Ces deux domaines sont affectés par des chevauchements à la base des versants Ouest. La structure géologique de ces massifs jouent un rôle capital dans l'hydrogéologie des systèmes karstiques.

Dans cette zone, l'altitude varie de 200 à 1500 m pour les plus hauts sommets (Dent du Chat sur le chaînon jurassien et le Nivolet sur le massif des Bauges). En Chartreuse certains sommets peuvent atteindre les 2000 m (le Gran Som). Les altitudes ne dépassant que rarement les 1500 m, la zone d'étude se situe donc dans des conditions de moyennes montagnes.

1.2 Contexte structural

La formation du relief des chaines subalpines septentrionales et jurassiennes peut se résumer en deux étapes : les déformations anté Molassiques et les déformations syn et post molassiques. Les molasses sont des formations de roches sédimentaires détritiques syn-orogéniques, qui s'accumulent dans des bassins périphériques d'une chaîne de montagnes. Les molasses sont souvent des grès à ciment de calcaire argileux, parfois de couleur verte à cause de la glauconie. Les molasses plus proximales présentent des galets, formant ainsi des conglomérats. Elles sont fréquemment accumulées dans des bassins flexuraux (créés par la flexure de la lithosphère sous le poids de la chaîne de montagne en cours de formation) et sont souvent reprises par les chevauchements les plus externes de l'orogénèse. À la différence des flyschs, qui s'accumulent en domaine marin profond, les molasses sont des sédiments marins peu profonds (littoraux) ou continentaux. Dans les préalpes, elles se sont déposées à partir de l'Oligocène inférieur.

Les déformations anté molasse

La première déformation de grande envergure se produit au milieu du Crétacé (Barremo-Albien), c'est une phase compressive qui résulte de la remontée de la plaque Adriatique vers la plaque Européenne à une vitesse de 13 mm.an⁻¹

[Ford *et al.* 2006]. Ce mouvement se poursuit avec la phase pyrénéo-provencale (Eocène Moyen - Oligocène) et entraîne une compression Nord-Sud permettant la formation de failles normales. Au Paléocène, la compression correspond aux prémices de l'orogénèse et des premiers plissements alpins [Gidon 1997]. Il existe une phase précocée d'érosion anté Miocène où les massifs subalpins et jurassiens ont été pénéplanés.

Les déformations syn et post molasse

La seconde déformation (Oligo-Miocène) permet les premiers cisaillements tangentiels affectant les barres du Tithonique par des chevauchements de failles inverses. Cette phase permet les premiers plissements de la Chartreuse et des Bauges [Gidon 1999]. La plaque Adriatique converge toujours vers la plaque Européenne mais effectue une rotation antihoraire de 20° . La vitesse de la surrection se réduit et passe à 5 mm.an^{-1} [Gidon 1999]. Durant cette période (anté Miocène), le relief orogénique est à son maximum ; il en est de même pour les taux d'érosion. Cette phase est en continuité plus ou moins indirecte avec les premières déformations anté molassiques.

Avant la dernière déformation compressive, a eu lieu une phase d'extension qui a permis, entre autre, de créer la faille de l'Arcalod [Gidon 1996]. La dernière déformation appelée ponto-rhodanienne est datée du post Miocène (5 Ma), elle est dite phase ultime, et a permis de mettre en place les reliefs actuels. C'est une déformation tectonique paroxysmale qui entraîne un raccourcissement horizontal des terrains provoquant l'orogénèse et le plissement des Alpes. Ce raccourcissement s'accompagne d'un décollement au niveau des marnes oxfordiennes des massifs des Bauges et de la Chartreuse [Gidon 1995]. Il provoque par endroit un doublement des séries stratigraphiques. Le Jura est défini comme un obstacle et subit une rotation de ses structures les plus méridionales. Ce pivotement vers l'Ouest de la portion méridionale se traduit par la naissance d'une faille chevauchante au front de la structure anticlinale coiffée du Mont du Chat - l'Épine [Lamiriaux 1977]. Le pendage relevé dans le flanc oriental est de 40 à 45° , et sub-vertical pour le flanc Ouest. Au cours de cette période se produit un charriage de la Chartreuse et des Bauges [Santos Narvaez 1980, Gidon 2001], ainsi que la création de failles conjuguées décrochantes (N70 et N165).

A la suite de cette compression, débute un nouveau régime d'extension Plio-Pleistocène, considéré comme phase d'effondrement orogénique [Champagnac *et al.* 2006]. Enfin au quaternaire, le régime extensif et l'approfondissement des vallées sont amplifiés par les glaciations [Talour 1976]. Les structures tectoniques des différents massifs sont illustrés par les coupes géologiques de la Figure 2.3.

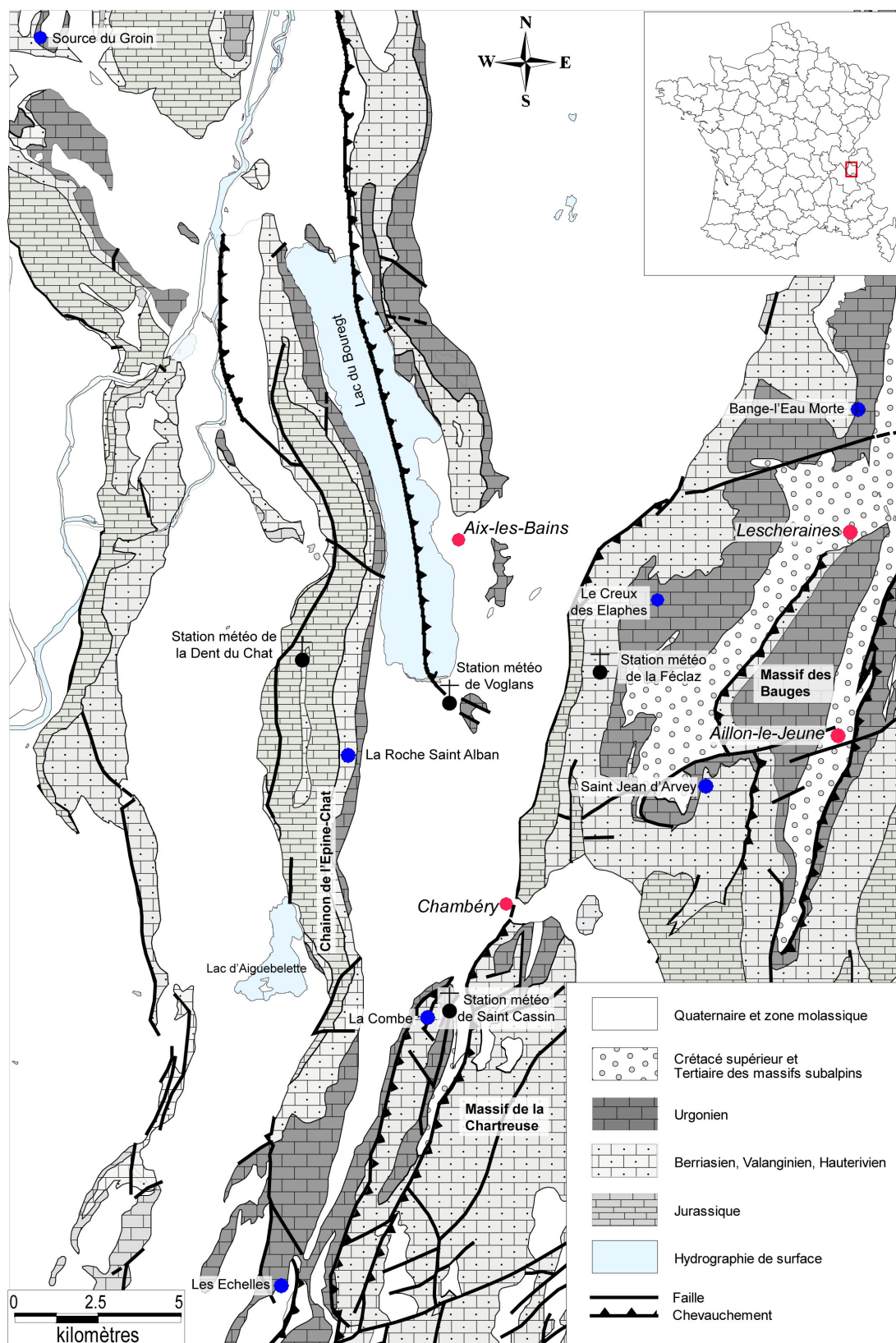


FIGURE 2.2 – Schéma structural de la zone d'étude et localisations des sites d'étude

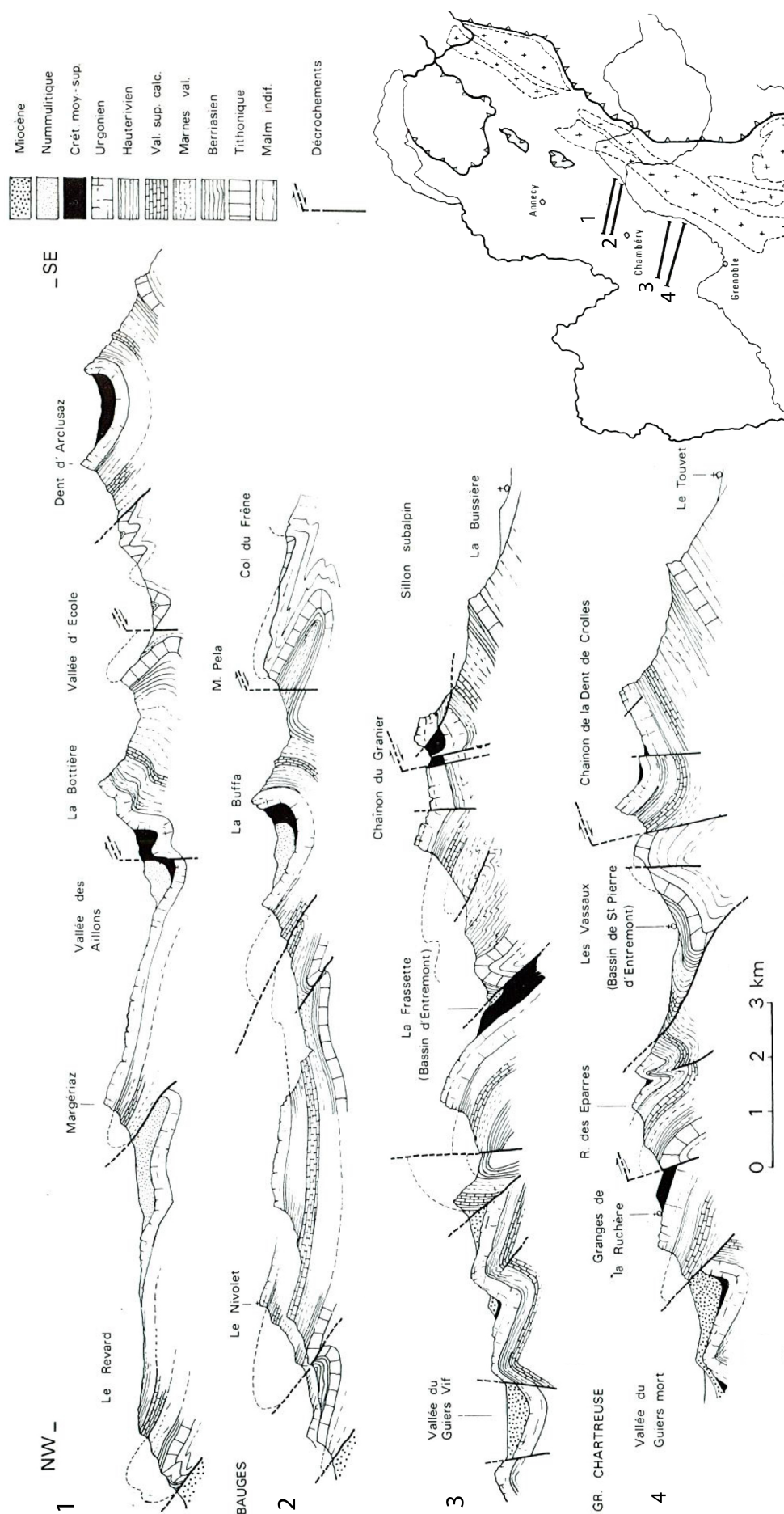


FIGURE 2.3 – Style tectonique des Chaînes subalpines septentrionales : le massif des Bauges et le N de la Chartreuse [Debelmas 1974]

1.3 Unités stratigraphiques

Le contexte géodynamique des chaînes subalpines reste essentiellement marqué par les différentes transgressions marines ayant permis les dépôts sédimentaires (Figure 2.4). Ces dépôts rencontrés dans les massifs sont calcaires, marno calcaires et marneux. Le fond de vallées, au pied des massifs, est constitué principalement par des molasses (Figure 2.2).

Ce contexte favorise le développement des systèmes karstiques dans les différents horizons calcaires. Les dépôts carbonatés identifiés dans les massifs débutent au Jurassique. Les couches marneuses oxfordiennes représentent le substratum des aquifères calcaires du Kimméridgien et du Tithonique. Ces réservoirs karstiques se trouvent majoritairement sur le chaînon de l'Epine - Chat. Les dépôts du Crétacé caractérisent les massifs des Bauges et de la Chartreuse. Les marno-calcaires du Bérriasien jouent un rôle de couche imperméable des aquifères karstiques. Le Valanginien calcaire reposant sur les marno-calcaires constitue, par exemple, un réservoir en eau assez conséquent dans le massif de la Chartreuse. L'étage supérieur, défini par l'Hauterivien, se compose de marnes imperméables. Ces marnes constituent le substratum imperméable au sein des aquifères des calcaires massifs de l'Urgonien qui représentent des réservoirs importants dans les massifs subalpins. Le Tertiaire est essentiellement représenté en plaine par des molasses du Burdigalien. Quelques dépôts continentaux (grès) du Miocène affleurent également dans les massifs des Bauges.

Les différentes formations rencontrées sont détaillées en annexe 1 à partir de la littérature existante. Ainsi, pour le massif des Bauges, Gidon *et al.* [1963] ; Nicoud [1973] ; Lemordant [1977] ; Lepiller [1980] ; Zamolo [1980] ; Mujito [1981] ; Rampnoux [1998] et Najib Molaï [2000] ont été consultés. Pour le massif de la Chartreuse, Gidon *et al.* [1969a] ; Talour [1976] ; Bozonat [1980] ; Bergeret [1981] ; Baudoin [1984] et Marchand [1985]. Pour le chaînon jurassien Gidon *et al.* [1963] ; Lopez [2002] et Gallino [2007].

39

1.4 Conditions climatiques

L'Ouest de la Savoie est soumis à des influences climatiques océaniques, continentales et méditerranéennes. De plus, le relief introduit une différenciation spatiale avec de nombreux climats locaux et des microclimats. La zone est définie par un climat montagnard. Sous l'influence des flux océaniques, elle est marquée par des précipitations abondantes estimées à 1500 mm/an en moyenne. Il est mesuré un gradient pluviométrique vertical annuel de 70 mm/100 m. Cette région possède donc le gradient pluviométrique le plus élevé du domaine Rhône-Alpin [Hobléa 1999].

Sous l'influence des flux ouest, la partie occidentale des massifs devrait recevoir le maximum des précipitations. Cependant, les stations météorologiques positionnées sur les différents massifs montrent des particularités dans la répartition des hauteurs de précipitations. Les cœurs des massifs qui possèdent une altitude moins élevée que leur pourtour, détiennent les records de précipitations. Ainsi, au cœur du massif de la Chartreuse, des valeurs annuelles supérieures à 2000 mm ont été relevées (Figure 2.5), avec un record de 2689 mm sur le monastère de la grande Chartreuse en 1995 [Météo France]. Le cœur du massif des Bauges montre des cumuls de pluie d'environ 1900 mm. Les stations météorologiques installées sur le chaînon de L'Epine-Chat ne mesurent pas de cumul aussi important. Dans sa partie Sud (proche de Vimines), les plus forts cumuls annuels sont estimés aux alentours des 1650 mm.

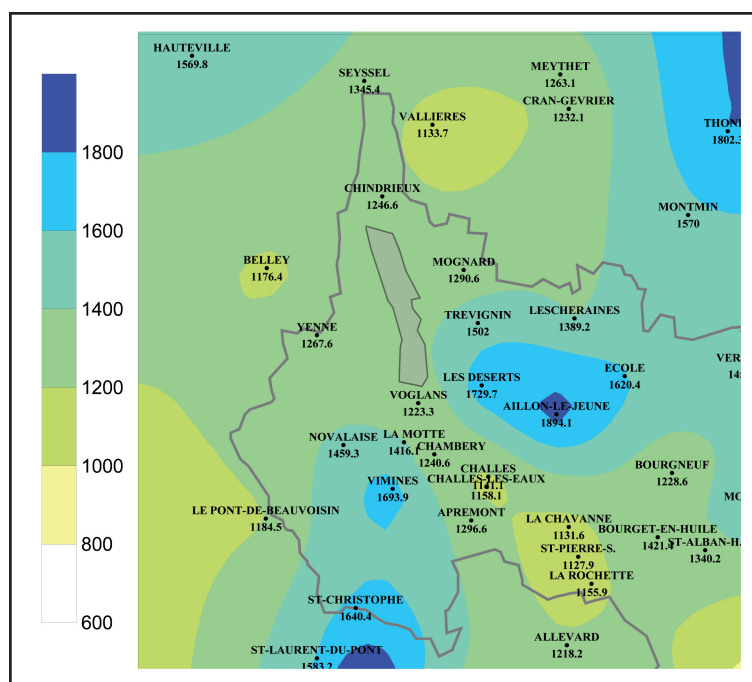


FIGURE 2.5 – Carte des précipitations moyennes annuelles (1992/2009) en millimètres sur l'Ouest de la Savoie [Météo France]

Les courbes des hauteurs des précipitations moyennées sur 5 ans (2006-2010) de trois stations météorologiques sont présentées en Figure 2.6. Elles représentent la station de Chambéry à une altitude de 245 m (en bleu), de la Dent du Chat (Chaînon

de l'Epine-Chat) à 1490 m (en rouge) et de La Féclaz (massif des Bauges) à 1500 m (en vert). Les trois courbes présentent les mêmes tendances. Elles montrent que, sur la période 2006-2010, les maximums des précipitations se situent aux mois de Mars, de Mai et de Novembre. Les mois les moins pluvieux sont les mois d'Avril et d'Octobre. Les valeurs moyennes annuelles de température sont inférieures à 10°C. Ce climat anormalement froid est lié à l'influence d'un fort gradient thermique (soit une perte de 0.5°C / 100 m) qui prédomine sur les flux océaniques relativement doux [Hobléa, 1999].

Les courbes des températures moyennes annuelles de trois stations météorologiques (Météo France) sont présentées figure 2.6. Les trois courbes évoluent de la même façon sur la période 2006 - 2010. Elles présentent un aspect unimodal avec un pic maximal pour le mois de Juillet. En été les températures moyennes sont comprises entre 15 et 20°C alors qu'en hiver elles varient entre -5 et 0°C.

Les températures moyennes mensuelles mesurées à la Dent du Chat et à La Féclaz sont très proches du fait d'une altitude des stations quasi similaires. Entre ces valeurs et celles mesurées à Chambéry, une différence de 5°C est notée induite par le gradient de température.

L'association des données du cumul mensuel des précipitations et des températures moyennes mensuelles permet de construire une courbe ombro-thermique de Gaussen (Figure 2.6). Cette courbe est utilisée afin de déterminer les mois humides et secs, au cours d'une année. Pour ce type de représentation, l'échelle des précipitations est deux fois plus importantes que celle des températures (10°C pour 20 mm de précipitation). Par convention, les mois pour lesquels la courbe ombrique (précipitations) est située au dessus de la courbe thermique sont des mois humides. Au contraire, les mois secs se signalent par le passage de la courbe thermique au dessus de la courbe ombrique [Lepiller 1980]. L'examen des courbes moyennes des trois stations sur la période 2006 - 2010 montre les mêmes tendances. Globalement, tous les mois sont humides car les courbes des précipitations sont toujours au dessus des courbes des températures moyennes. La période estivale, bien que la plus chaude, reste assez humide. Cette humidité est particulièrement présente en altitude. Seul le mois d'Avril marque une période d'humidité moins prononcée.

Le lac du Bourget, joue un rôle local important dans la régulation des températures. Il permet d'adoucir le climat en période froide par restitution de chaleur et de rafraichir les étés en absorbant une partie de la chaleur.

Représentativité de l'étude

La représentativité de l'étude est une phase importante dans cette recherche. Il est important de savoir si elle s'est effectuée pendant une période humide avec des réserves karstiques importantes ou dans une période sèche avec peu de réserve karstique. La station météorologique de Voglans (ou Chambéry-Aix) de par sa position centrale, représente bien la zone d'étude. Elle possède une chronique des précipitations relativement longue, de 1974 à 2011. Il faut bien entendu prendre en considération le gradient pluviométrique vertical pour extrapoler les données à l'ensemble des massifs.

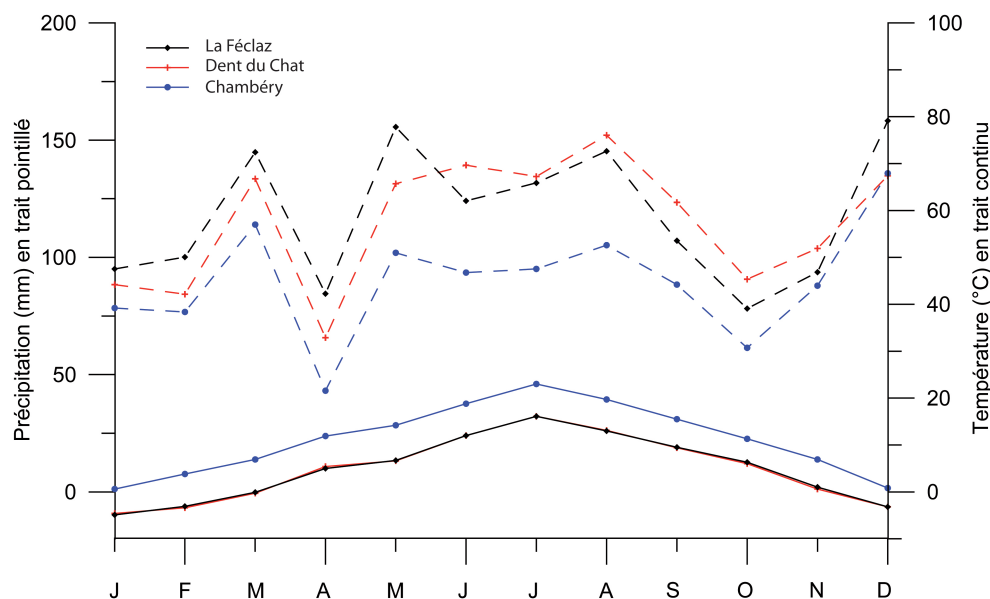


FIGURE 2.6 – Courbes ombro-thermiques de Gaussen de trois stations météorologiques : La Féclaz, La Dent du Chat et Voglans [2006-2010]

Traits continus = températures moyennes mensuelles, traits pointillés = précipitations mensuelles

La moyenne annuelle des précipitations sur 37 ans est de 1238.5 mm avec un écart type de 215.8 mm. La figure 2.7.a représente les écarts à la moyenne pluviométrique annuelle de 1974 à 2011. Nous notons que depuis 2004, toutes les années sont déficitaires. Afin de confirmer cette tendance, un second diagramme a été réalisé à une échelle plus restreinte, de 2000 à 2011 (Figure 2.7.b). La moyenne annuelle est plus basse avec un cumul moyen des précipitations de 1086 mm et un écart type de 164 mm. La figure 2.7.b présente les années 2009 à 2011 comme déficitaires à l'échelle mensuelle. L'étude se situe donc dans un contexte hydrologique de période sèche.

La répartition des pluies au cours des cycles hydrologiques est un paramètre important pour la représentativité de l'étude. La figure 2.8 présente les précipitations mensuelles sur la période de l'étude en fonction des valeurs moyennes calculées de 1974 à 2011.

L'année 2009 est globalement déficitaire de Janvier à Octobre. Seuls les mois de Novembre et de Décembre présentent un léger excès du cumul des précipitations par rapport aux valeurs moyennes. L'année 2010 présente les mois de Février, de Mai, d'Août et de Novembre comme des mois excédentaires dans le cumul des précipitations, alors que pour les autres mois, les précipitations sont déficitaires. L'année 2011 montre 3 mois excédentaires, les mois de Juin, Juillet et Décembre. Le cumul de précipitations de ces deux derniers mois est particulièrement important, représentant un excès de 150% vis à vis de la valeur moyenne. Enfin sur les trois années d'études, les mois d'Avril et d'Octobre sont très déficitaires, ils correspondent à 50% de la valeur moyenne.

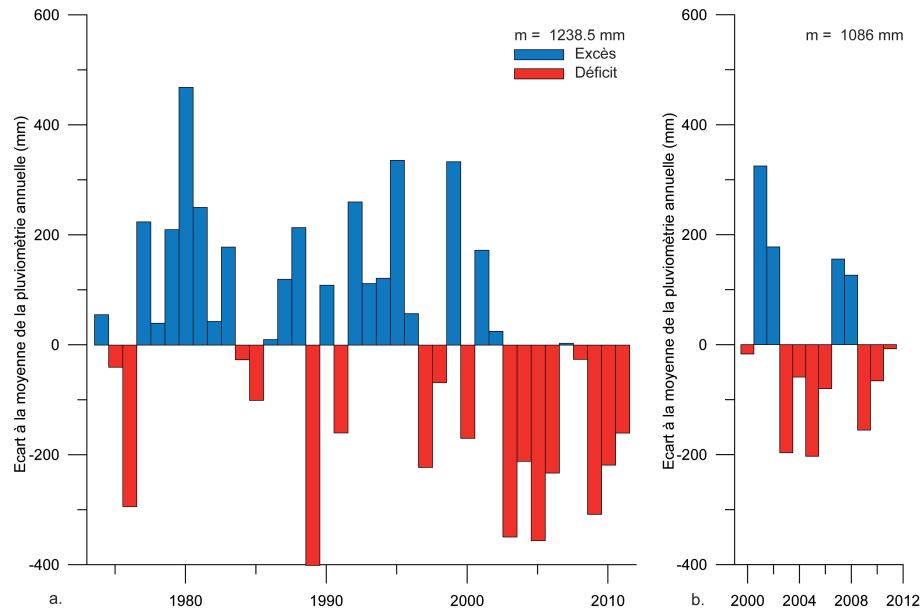


FIGURE 2.7 – Ecart à la moyenne pluviométrique annuelle à la station de Voglans de 1974 - 2011 (a) et de 2000 - 2011 (b)

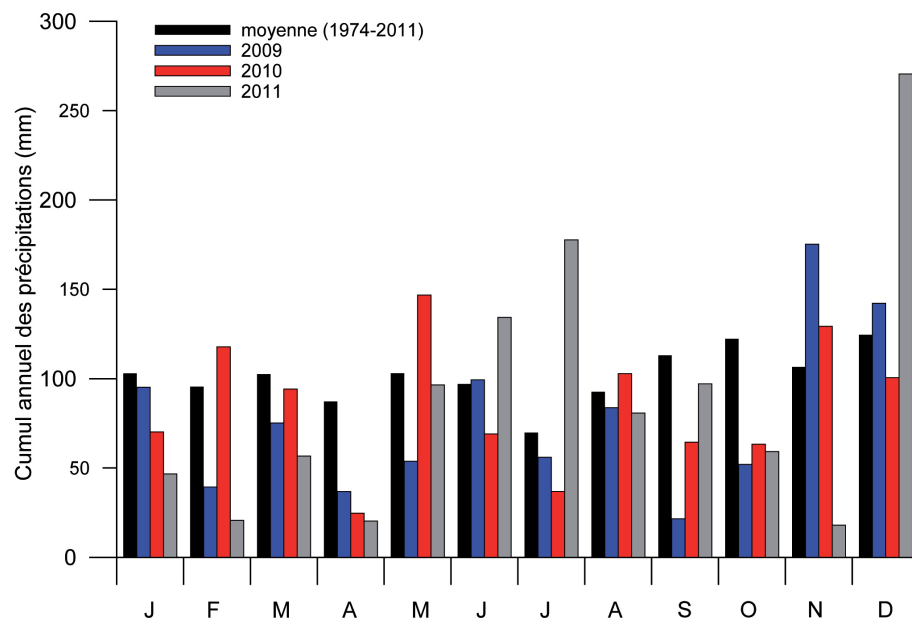


FIGURE 2.8 – Précipitations mensuelles de la période d'étude comparées aux moyennes de la station de Voglans (1974-2011)

Les trois années de recherche de la thèse se situe donc dans un contexte relativement chaud. Les précipitations sont déficitaires pour les mois de Mars - Avril et de Septembre - Octobre, alors que les mois de Novembre-Décembre sont excédentaires par rapport à la moyenne calculée sur 1974 - 2011. Ces trois années sont assez atypiques, il en sera tenu compte dans les analyses et les résultats (Cf infra).

2 Présentation des sites d'études

Pour répondre au mieux à la problématique de la vulnérabilité quantitative et qualitative des milieux karstiques des moyennes montagnes, 7 sites ont été sélectionnés.

Dans le cadre d'une identification d'un impact anthropique sur la qualité des eaux souterraines, quatre captages ont été retenus en relation avec le projet ALPEAU sur les critères suivants : (i) le contexte hydrogéologique (milieu karstique privilégié) ; (ii) les possibilités d'appareillage (débitmètre, turbidimètre, fluorimètre, . . .) ; (iii) le contexte forestier des périmètres de protection et plus largement du bassin d'alimentation (forêt publique privilégiée) ; (iv) l'état d'avancement de la procédure de mise en conformité des périmètres de protection des captages ; (v) l'accessibilité aux sources karstiques.

Ainsi les quatre sites retenus (Figure ??) sont le captage de La Roche Saint Alban (RSA) situé sur le chaînon de l'Épine-Chat, le captage de La Combe à Saint Cassin (SC) et de Fontaine Froide (ECH) à Saint Christophe-la-Grotte appartenant tous deux au massif de la Chartreuse et le captage de Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey (SJA) situé sur le massif des Bauges. En complément, la cavité karstique du Creux des Elaphes (ELA), dans le massif des Bauges, a été ajouté pour caractériser les écoulements épikarstiques.

Dans le cadre de la vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques face à un changement climatique, trois sites ont été sélectionnés car ils possèdent tous une longue série de données de débit et de précipitation. Il s'agit du système karstique de la Source du Groin appartenant au domaine jurassien, de la rivière du Chéran et de la source karstique de Bange - l'Eau Morte situées toutes les deux dans le massif des Bauges.

Chaque site retenu, en fonction des connaissances acquises, a fait l'objet d'une étude hydrogéologique afin de déterminer le fonctionnement des systèmes karstiques.

2.1 La Roche Saint Alban

Les sources de La Roche Saint Alban (Figure 2.9) appartiennent au flanc oriental du grand anticlinal du chaînon de l'Épine - Dent du Chat (Figure 2.2). Le chevauchement, à l'Est de Vacheresse, plonge vers l'Est et semble s'horizontaliser à des profondeurs relativement faibles. Cette interprétation est réalisée à partir des profils sismiques [Gidon et Barfety 1969] et du tracé du tunnel d'évacuation des eaux usées du Bourget du Lac qui recoupe cet accident. Le karst se développe dans les calcaires du Kimméridgien jusqu'au Valanginien. Les émergences se situent à 525 m d'altitude, au contact des marnes hauteriviennes constituant le toit de l'aquifère. Ce contact est masqué par des éboulis grossiers.



FIGURE 2.9 – Evacuation du trop plein des sources hautes de La Roche Saint Alban

Les couches réservoirs, composées par les calcaires du Jurassique supérieur et du Berriasien-Valanginien, plongent sous les marno-calcaires de l'Hauterivien (Figure 2.10). Les couches aquifères constituent ainsi une zone noyée sous la source permettant une réserve relativement importante [Rampnoux 1998]. L'aquifère est limité à sa base par des marnes oxfordiennes imperméables (Figure 2.10).

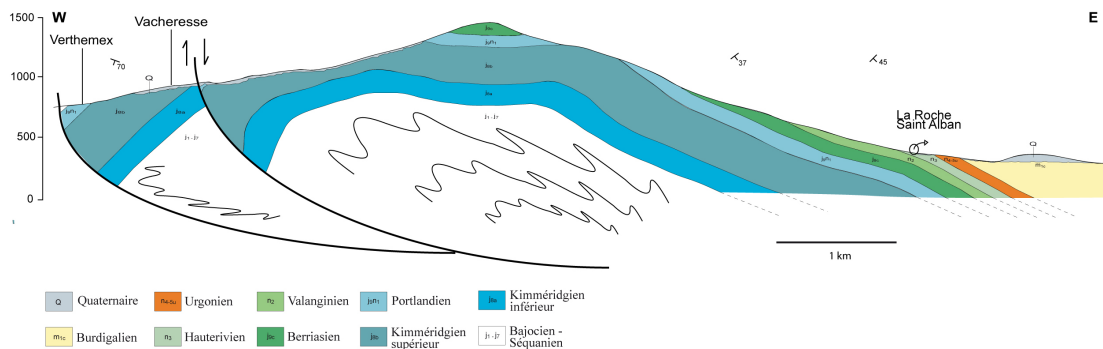


FIGURE 2.10 – Coupe géologique interprétative passant par la source de La Roche Saint Alban

Sur le bassin d'alimentation, le Tithonique est très fracturé et particulièrement altéré sur plusieurs mètres de profondeur. Ceci peut favoriser le développement d'un aquifère épikarstique. La source, située dans une légère dépression selon un axe Nord - Sud, draine le flanc oriental de l'anticlinal. Des traçages réalisés sur le chaînon [Rampnoux *et al.* 1985] ont prouvé que le sommet de l'anticlinal faisait partie, entre autres, de la zone de recharge de la source (Le traçage est présenté en Annexe 2).

Sur le bassin d'alimentation d'une superficie estimée à 8 km², de nombreuses cavités, correspondant à des puits verticaux, ont été répertoriées. Aucune galerie horizontale pénétrable n'est reconnue. Des relevés de terrain [Rampnoux *et al.* 1985] permettent de réaliser une analyse statistique de la fracturation de surface sur le bassin d'alimentation de la source (Figure 2.11). Cette analyse, basée sur la mesure d'une cinquantaine de relevés de fracture, montre deux familles majeures de fracturation de direction N080-N090 et N100-N120. Ces familles possèdent une direction similaire à la faille transverse à jeu sénestre du col du Chat dans sa partie Est [Rampnoux *et al.* 1985]. Elles sont rattachées à la phase de compression Alpine Est-Ouest. L'intense fissuration rend les calcaires très perméables avec des directions privilégiées d'écoulement N080-N090 et N100-N120.

Le captage alimente en eau potable une partie de la commune du Bourget ainsi que les lieux-dits alentours. Le débit moyen capté est de 21 L.s⁻¹. Sur les deux sources

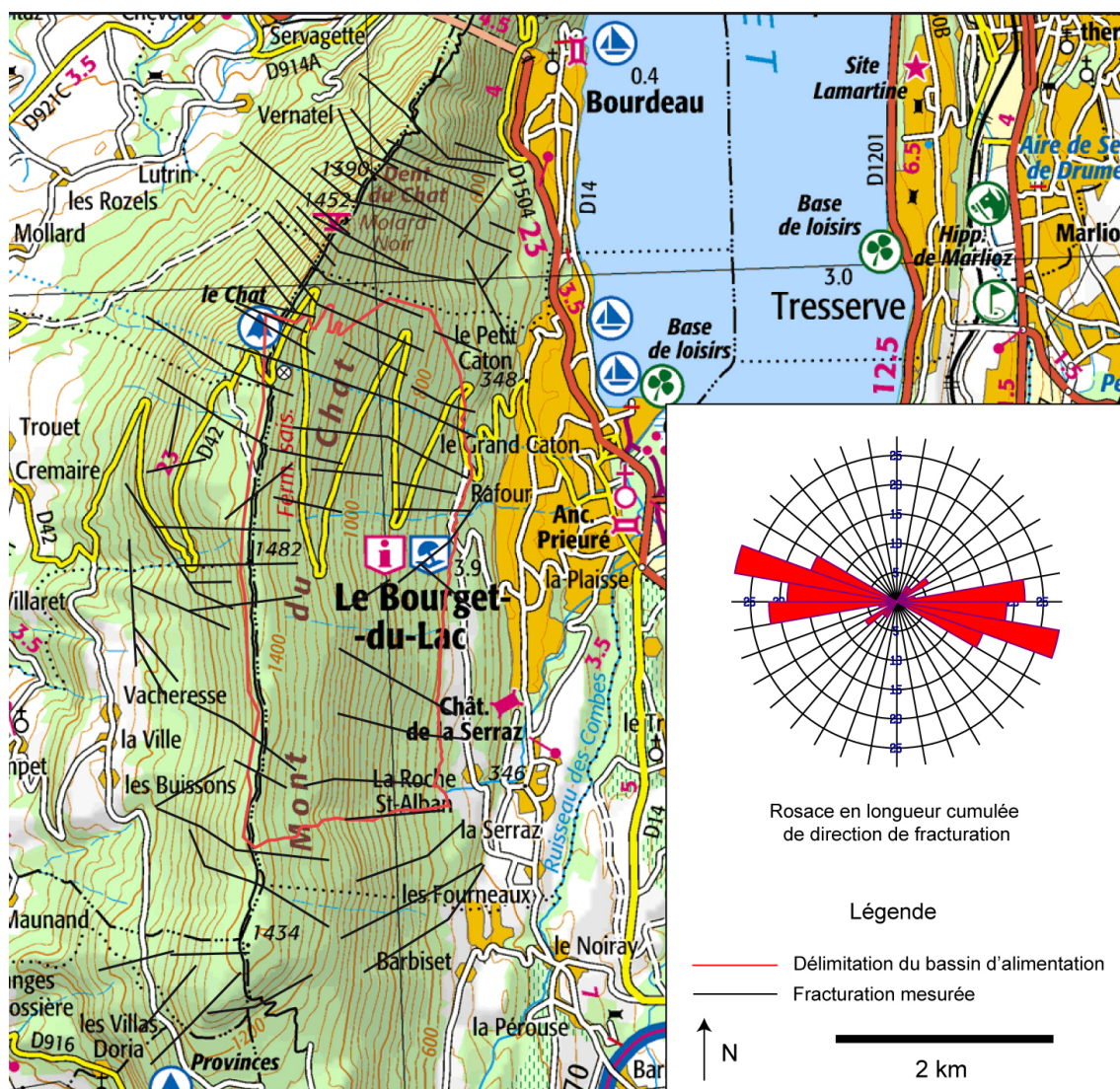


FIGURE 2.11 – Représentation des fractures et de la rosace en longueur cumulée des directions de fracturations du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban

karstiques de ce système, seule la source du bas est captée pour l'alimentation en eau potable. Le trop plein a été canalisé initialement pour le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique maintenant abandonnée. Le site est équipé pour pouvoir mesurer le débit de l'ensemble des exutoires. Cette mesure intègre le volume d'eau passant dans un canal venturi, qui sert à l'AEP, ainsi que l'eau rejetée dans le ruisseau du Nant Varon calculée via un capteur de pression qui mesure la hauteur d'eau à l'amont et d'un seuil trapézoïdal adapté à de fortes amplitudes de débit (entre 30 et plus de 700 L.s^{-1} sur les chroniques étudiées).

2.2 La Combe à Saint Cassin

Le captage de La Combe (Figure 2.12) se situe dans la partie la plus occidentale de la Chartreuse (Figure 2.2). Cette zone présente une structure anticlinale déversée vers l'Ouest, le flanc occidental étant subvertical et le flanc oriental penté vers l'Est. La route anticlinale épaisse plonge vers le Nord (Figure 2.13) et est affectée par de

nombreux accidents tectoniques. Le karst se développe dans des calcaires lités du Valanginien. L'exutoire, capté depuis 1955 sur le hameau de La Combe, appartient à la commune de Saint Cassin. Le captage consiste en une galerie de gros diamètre qui s'enfonce de 12 m dans le talus pour drainer les calcaires valanginiens. L'eau captée arrive dans des bacs décanteurs, où d'un côté l'eau est acheminée à la station de filtration en contre bas et de l'autre côté elle se déverse dans un ruisseau temporaire menant à la cascade de Couz. La station de filtration, se situe à une cinquantaine de mètre du captage et permet un apport de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour la ville de Chambéry. La station possède deux membranes de filtration une première à $500 \mu\text{m}$ et une deuxième à $0.2 \mu\text{m}$.



FIGURE 2.12 – Captage de la source de La Combe

La source se situe à une altitude de 586 m et possède un bassin d'alimentation estimé à 2.5 km^2 . L'émergence ne se trouve pas au contact direct des marnes hauteriviennes (Figure 2.13) mais à un niveau où les calcaires du Valanginien à faciès dit "marbre batard" [Gidon and Barfety 1969] deviennent plus compétents. Au dessus du Valanginien sont posées les marno-calcaires hauteriviens. Enfin, la série se termine par des puissants calcaires urgoniens qui déterminent le Mont Outheran, la dent du Corbeley et la dalle de Bonne Allée.

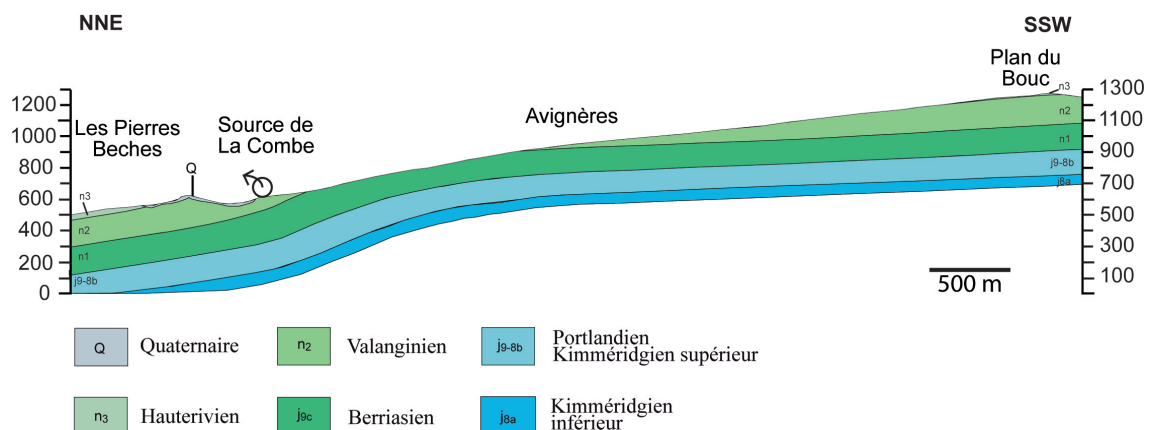


FIGURE 2.13 – Coupe géologique interprétative NNE-SSW passant par La Combe (voir tracé du trait de coupe 4 Annexe 2)

La source draine une bonne partie de l'anticlinal du Corbelay situé plus au Nord. La structure de l'aquifère valanginien induit une partie noyée sous la source avec un

volume relativement important (Figure 2.14).

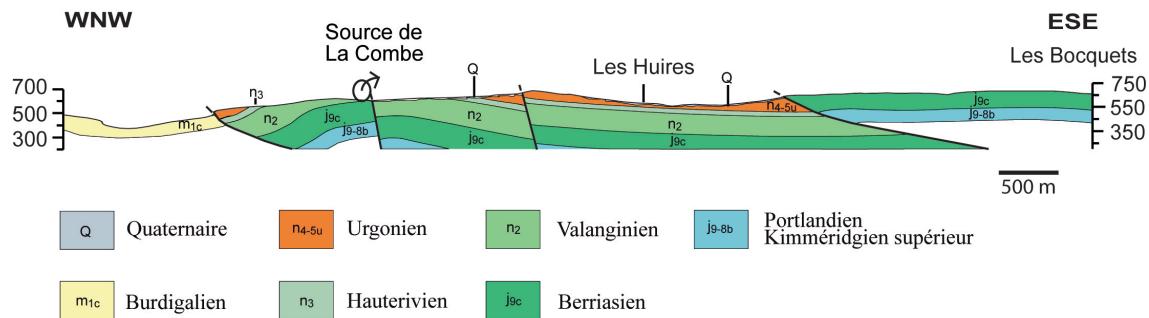


FIGURE 2.14 – Coupe géologique interprétative WNW-ESE au niveau de La Combe (voir tracé du trait de coupe 4' Annexe 2)

Il n'existe pas, sur la zone d'intérêt, de réseau karstique topographié (même si le Mont Outhéran présente des réseaux visitables par l'homme), ni de fractures mesurables sur le terrain. L'analyse du développement du système karstique de La Combe n'est donc pas réalisable. Cependant, les réseaux de dissolution sont bien développés dans les calcaires valanginiens et urgoniens. Les calcaires urgoniens sont très perméables mais leur disposition structurale orientée vers l'Est ne permet pas un apport en eau. La source de La Combe est principalement alimentée par les calcaires du Valanginien, les marno-calcaires hauteriviens étant pratiquement imperméables.

2.3 Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey

Appartenant au massif des Bauges, la source de Fontaine Noire (Figure 2.15), située à 730 m d'altitude, correspond à l'exutoire du Mont Peney (Figure 2.2). Le système karstique de Fontaine Noire, de type jurassien, possède un bassin d'alimentation de 3.5 km². L'émergence en sortie de grotte a été aménagée pour capter un débit moyen de 15 L.s⁻¹ afin d'alimenter en eau potable la commune de Saint Jean d'Arvey. En période d'étiage, le débit de la source est estimé à 5 L.s⁻¹ tandis qu'en période de crue il peut atteindre les 700 L.s⁻¹.

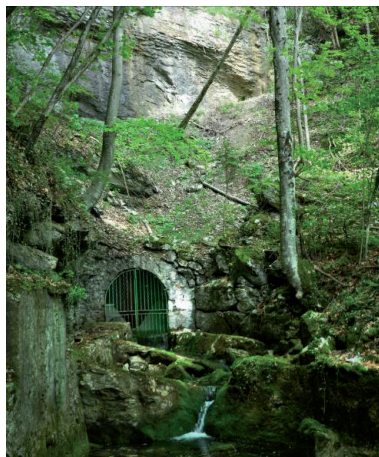


FIGURE 2.15 – Captage de la source de Fontaine Noire

Situé au Nord du système Revard - Féclaz, le système karstique se développe dans les calcaires massifs de l'Urgonien (Figure 2.16). L'aquifère est limité à sa base par une couche imperméable formée par les marnes hauteriviennes (Figure 2.16). Les eaux peuvent localement traverser des dépôts continentaux caractérisés par des argiles sableuses rougeâtres, des sables, des grès et des micropoudingues.

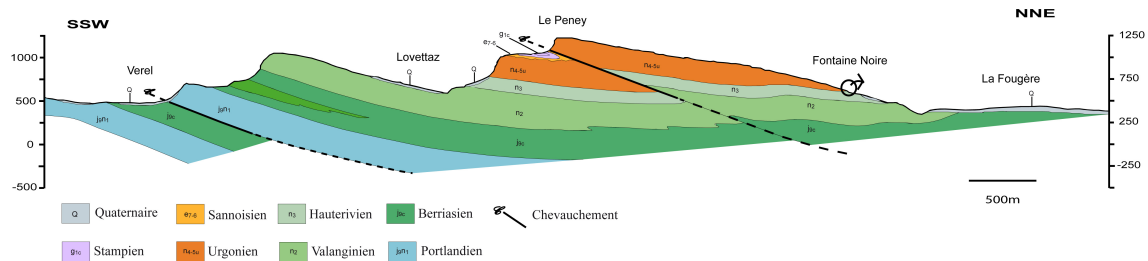


FIGURE 2.16 – Coupe géologique interprétative SSW-NNE au niveau de Fontaine Noire

(voir tracé du trait de coupe 3 Annexe 2)

Dans les années 70, la topographie de l'exsurgence de la source a été réalisée sur une distance de 450 m dans l'Urgonien. En s'appuyant sur le schéma (Figure 2.17), il a été possible de déterminer des directions préférentielles du développement du système karstique à proximité de l'émergence. Comme une seule partie du réseau karstique a été visitée, l'analyse ne donne qu'une tendance du développement karstique.

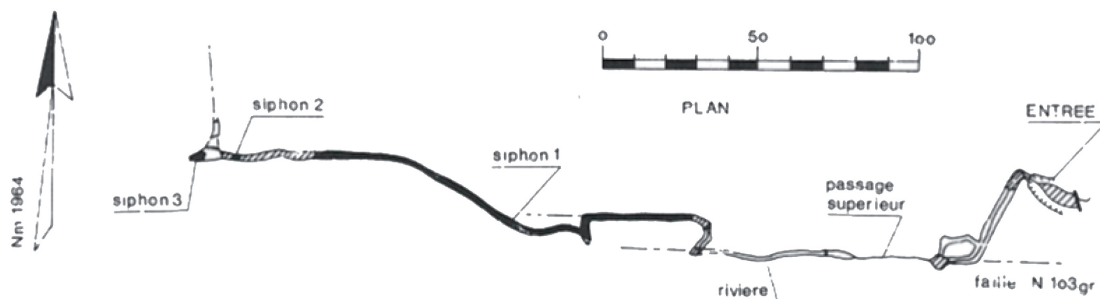


FIGURE 2.17 – Topographie de la grotte de Fontaine Noire [cds73 1975]

L'analyse statistique des directions du développement karstique en longueur cumulée permet de faire ressortir une direction majoritaire N090-N100 qui caractérise un développement de failles de direction N100. De plus, deux directions mineures N020-N030 et N110-N120 de développement karstiques sont concordantes avec les directions des fractures relevées sur le terrain.

2.4 Fontaines Froides aux Echelles

Deux cavités appartenant aux gorges de l'Echaillon [Lopez and Delannoy 2002] composent le système karstique des Echelles. La première Fontaine Froide, appelée aussi Fontaine Vive (Figure 2.18), se situe à 425 m d'altitude soit quelques mètres au dessus du cours du Guiers vif. L'émergence pérenne a été aménagée après la seconde guerre mondiale et alimente, par un répartiteur, les communes de Saint-Christophe-la-Grotte, les Echelles, Entre-Deux-Guiers et Saint-Christophe-Entre-Deux-Guiers. A l'étiage, le débit est estimé à 25 L.s^{-1} et le débit moyen serait de 250 L.s^{-1} . Il y est capté $500 \text{ m}^3.\text{j}^{-1}$.

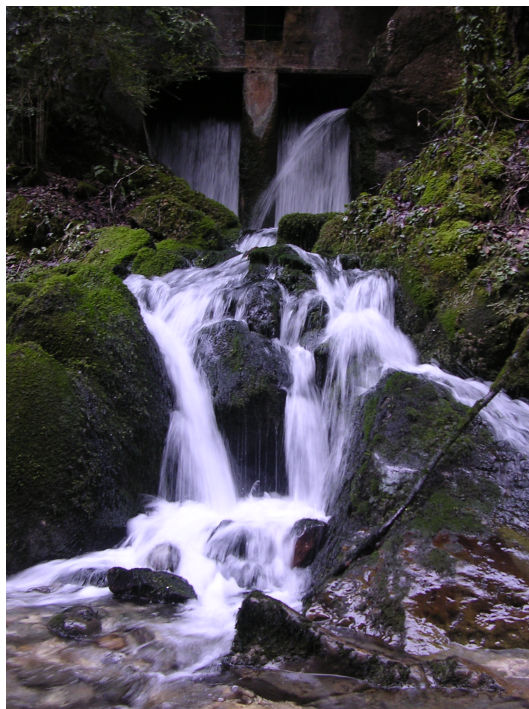
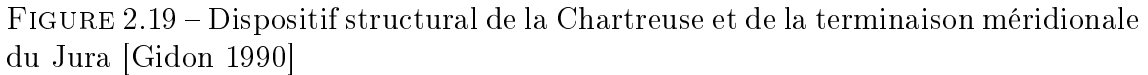


FIGURE 2.18 – Captage de la source karstique de Fontaine Froide [Hobléa 2008]

La seconde cavité, appelée Grotte Perret – Fontaine Froide des Echelles, se situe 20 m au dessus de la source pérenne. Ce réseau, comprenant deux entrées, possède un développement de 2400 m auquel peut s'ajouter 900 m de galeries noyées. Ce trop plein de Fontaine Froide s'ouvre par un grand porche (20 m sur 20 m) encombré par de nombreux débris (blocs issus de la gélifraction, galets morainiques, argiles...).

La source de Fontaine Froide se situe à la limite du massif jurassien du Mont Beauvoir et du massif de la Chartreuse. Le système karstique se développe dans les calcaires à faciès Urgonien du Barrémo-bédoulien (Figure 2.19); ces calcaires constituent l'un des traits communs entre les domaines subalpins et jurassiens.

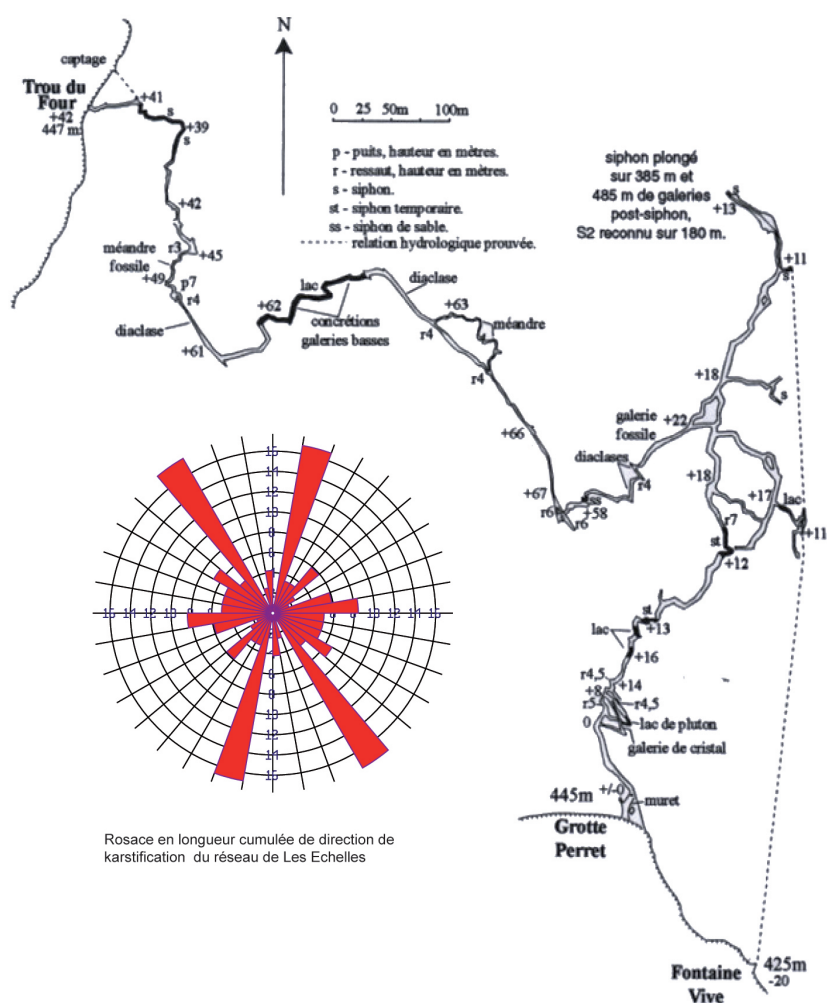


L'exploration du réseau Grotte Perret – Trou du Four a permis la réalisation d'un plan topographique (Figure 2.20). A partir de celui-ci, on peut déterminer les directions préférentielles du développement karstique (Figure 2.20). L'analyse des directions du développement karstique en longueur cumulée (Figure 2.20) permet de dégager trois directions de développement. Les deux directions N010-N020 et N080-

Tableau 2.1 – Paramètres issus de l'analyse des courbes de récession

Exsurgences	Récurrence
Emergence occulte dans le lit du Guiers	Exsurgence pérenne
Fontaine Vive	Exsurgence pérenne
Grotte Perret ou Fontaine Noire	10 à 15 fois par an
Grotte supérieure des Echelles	1 à 3 ans
Trou du Four	15 ans
Grotte de la Folatière	20 ans

N090 pourraient être expliquées par la tectonique de surface, la faille de Voreppe présente, sur ce massif, une direction Nord – Sud associée à des décrochements Est - Ouest. Nous observons aussi un développement karstique majeur possédant une direction N140-N150.

FIGURE 2.20 – Topographie du réseau des Echelles (www.Plongéessout.fr)

2.5 Le Creux des Elaphes

Situé au Nord-Ouest du plateau du Revard (Figure 2.2), la cavité karstique nommée le Creux des Elaphes (Figure 2.21) se situe à une altitude de 1370 m. Elle s'est développée en subsurface (d'une profondeur variant de -4 à 14 m) au Miocène dans les calcaires du Barrémien à faciès Urgonien [Hobléa et Philippe 2001]. Le Creux des Elaphes appartient au système karstique de la source du Sierroz. La surface du karst est constituée de deux types de sol : les organosols qui se développent sur des dalles calcaires lapiazées ; les calcisols et les brunisols (sols bruns calciques et sols bruns) qui se développent dans les dépressions sur des dépôts limono argileux. Le Creux des Elaphes est un site pilote du laboratoire EDYTEM, il a déjà fait l'objet de nombreuses expériences, notamment pour la compréhension du moonmilk.

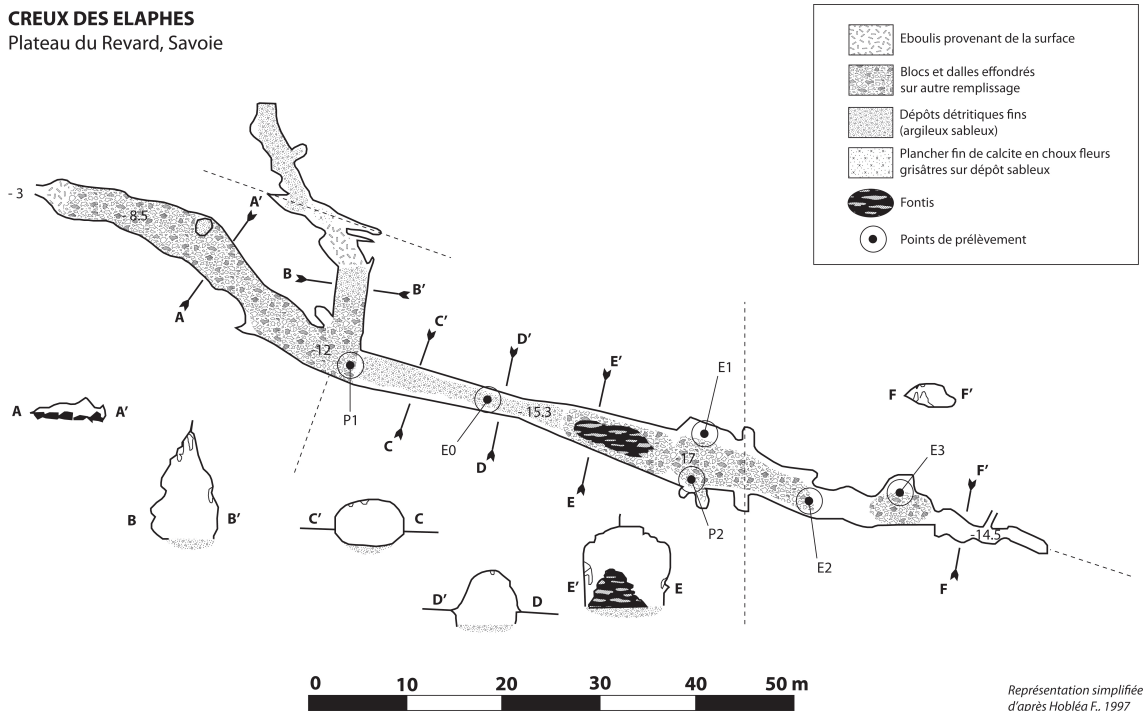
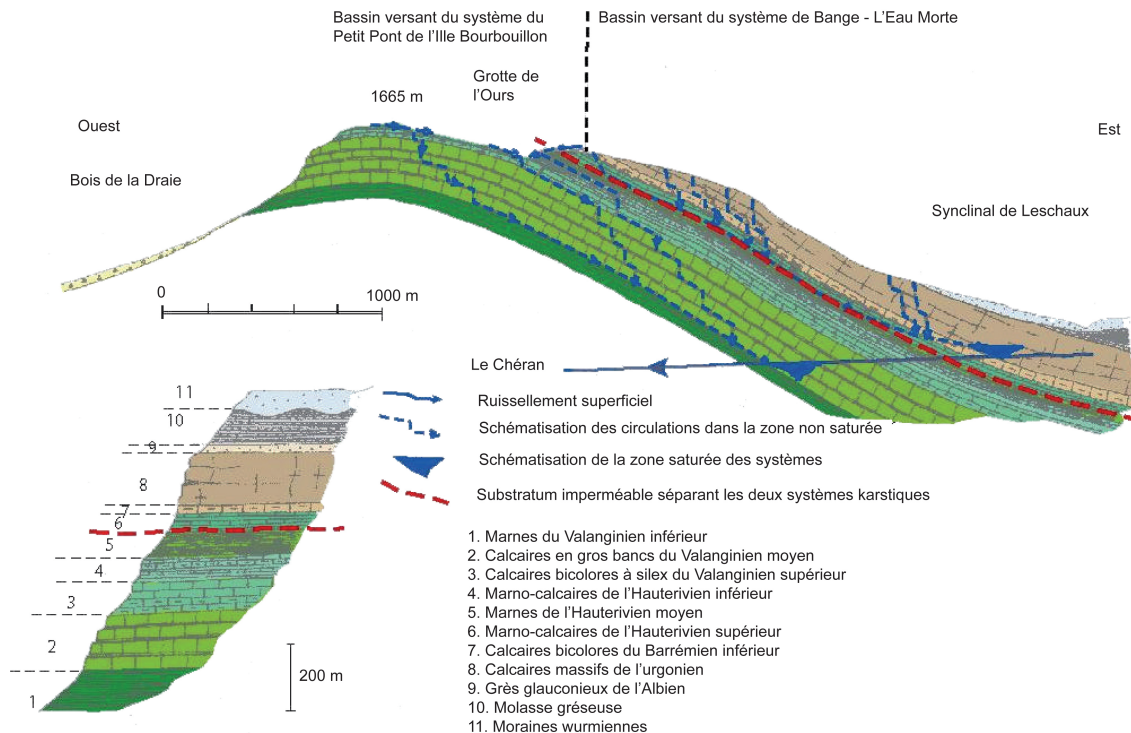


FIGURE 2.21 – Cartographie spéléo-morphologique du Creux des Elaphes [Hobléa 1997]

2.6 Bange – l'Eau Morte

Appelé aussi système du Nant de la Combe, le système est localisé dans le massif des Bauges et correspond à l'exutoire le plus important du Semnoz. Ce système de petite taille possède une grande karstification permettant un écoulement très rapide des eaux. Il occupe une superficie de 12,3 km² et s'étend de 640 à 1699 m d'altitude, avec une altitude moyenne de 1225 m. Ce système doit son nom aux deux grottes qui permettent d'accéder directement à la zone saturée, la grotte de Bange et la grotte de l'Eau-Morte, situées à proximité du seul exutoire pérenne du système, le Nant de la Combe. D'un point de vue stratigraphique et tectonique, ce système est très homogène : sa lithologie est constituée à plus de 90% par une dalle de calcaire urgonien et aucune faille majeure ne vient rompre l'homogénéité de la dalle cal-

caire (Figure 2.22).



Mathevet, 2002

(d'après Lepiller, 1980)

FIGURE 2.22 – Coupe perpendiculaire à l'axe de l'anticlinal du Semnoz [Mathevet 2002]

Etudiée depuis les années 70 par Lepiller, la source de Bange - l'Eau Morte a été caractérisée lors des travaux de Mathevet [2004] expliquant l'existence d'un trop plein à partir de $0,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ à partir de la courbe des débits classés. Elle présente une double rupture de pente qui selon Mathevet pourrait s'expliquer par la reprise d'un paléokarst plus transmissif. Cependant, Marsaud [1997] explique ce type de double pente par le piégeage d'une réserve lors de la décrue et sa restitution lors du tarissement. Ce système est de type Aliou selon la classification de Mangin [1975]. La réponse de ce type de système s'explique par un hydrogramme unitaire d'un bassin de surface présentant : un effet mémoire réduit (peu de réserves), une fréquence de coupure très haute (peu de filtrage) et un temps de régulation court (réponse impulsionnelle très brève).

L'analyse des directions du développement karstique en longueur cumulée (Figure 2.23) permet de définir une direction principale d'orientation N020-N030 (30 %). Cette direction pourrait correspondre à l'axe des plissements sur cette zone. On peut noter aussi la présence de deux directions secondaires : la première orientée N120-N130 (15 %) pourrait être induite par l'ouverture des failles lors de la compression Miocène ; la deuxième direction N180-N010 (11 %) pourrait être caractéristique de l'ouverture des failles lors de la phase d'extension Oligocène.

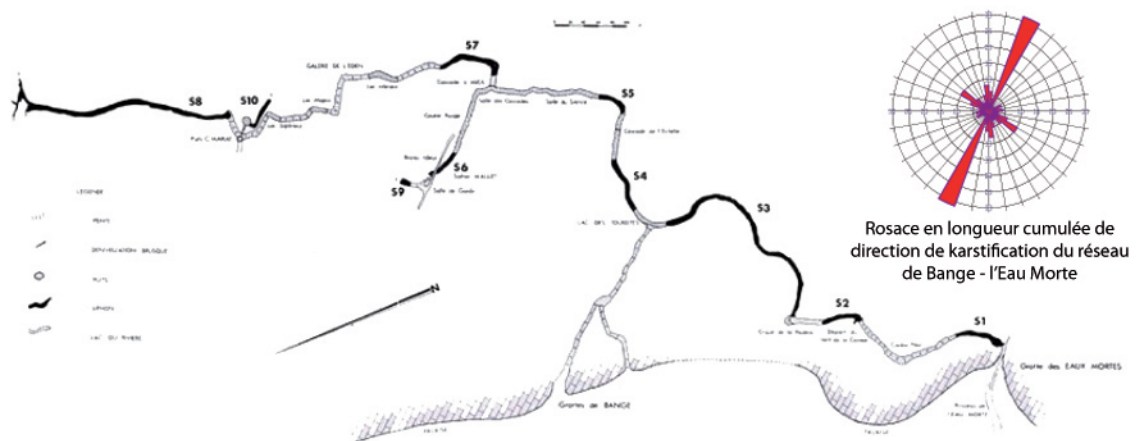


FIGURE 2.23 – Topographie du réseau Bange – l'Eau Morte (Plongéessout)

2.7 Le Chéran

Le Chéran (Figure 2.24) est une rivière qui draine un bassin versant de 433 km² (Figure 2.25) appartenant à deux départements : la Savoie et la Haute Savoie. Il prend sa source dans le massif des Bauges à 1450 m d'altitude dans le vallon de Belliveaux.

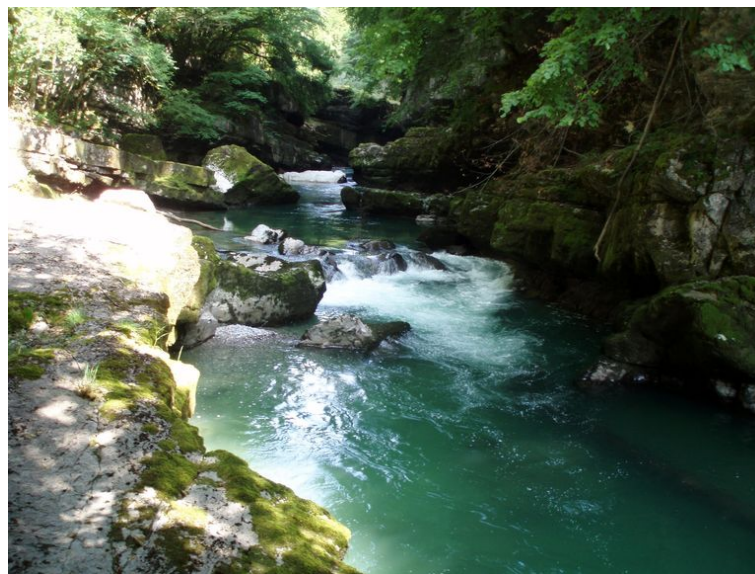


FIGURE 2.24 – Le Chéran [photographie de Pegéot 2011]

Le réseau hydrographique du Chéran repose essentiellement sur des calcaires permettant une infiltration et des circulations souterraines, toutefois sur sa partie aval lorsque le substratum est molassique, il s'encaisse dans de profondes gorges. De direction Nord - Ouest, il s'écoule sur plus de 50 km. Il possède de nombreux affluents tels que le ruisseau des Grands Prés (ou des Clos) à École, le Nant de Jarzy, le Nant d'Aillon, le Nant des Granges au Châtelard ou encore le Nant d'Orange ou Saint Martin à Lescheraines. Le Chéran possède un régime pluvio-nival avec des débits maximums de Mars à Mai ainsi qu'en automne. Les débits sont régulés par

les chutes de pluie et de neige, les débits caractéristiques du Chéran sont reportés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Débits moyens du Chéran [données Agence de l'Eau]

Paramètres	Débits $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Module interannuel	9.5
Crue décennale	210
Crue centennale	340
Etiage sévère	1

Pour notre étude, l'ensemble du bassin versant de la rivière n'a pas été étudié, les données de la banque Hydro (gérée par la DREAL) ont été obtenues à la station hydrologique d'Allèves. Cette zone couvre un peu plus de 70% du bassin versant. Cette rivière est intéressante pour notre étude, car elle est alimentée par de nombreuses sources karstiques.



FIGURE 2.25 – Présentation du bassin versant du Chéran [Lecuret *et al.* 2010]

2.8 La source du Groin

La source du Groin (Figure 2.26), à Artemare dans l'Ain, appartient au massif jurassien. Située à 516 m d'altitude, cette source de type vauclusien peut atteindre des débits maximums de $5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. D'après la fiche de l'étude des ressources en eau souterraine des massifs calcaires du département de l'Ain réalisée par le bureau ATM3D : *"Le système karstique s'inscrit dans le vaste synclinal du Valromey. Il est délimité à l'Ouest par l'anticlinal de Cormaranche-les-Moussières et à l'Est par l'anticlinal chevauchant du Grand-Colombier. Le Valromey a subi un important recouvrement glaciaire masquant les éventuelles failles et formes karstiques. Les flancs du synclinal sont composés par les formations Bathoniennes à Berriasiennes inférieures, le fond par le Crétacé (Berriasien à Aptien), le Miocène inférieur et les dépôts glaciaires. L'aquifère karstique principal se développe dans les calcaires du Portlandien et du Valanginien. Le Kimméridgien supérieur marneux joue le rôle d'éponte imperméable sur les deux tiers Nord du synclinal. Le réseau de drainage n'est que partiellement connu dans la partie amont du système (grotte de Préoux 8,3 km) et dans la partie aval (source du Groin : 1,8 km) où les reconnaissances en plongée ont mis en évidence une zone noyée importante"*.

Cette même fiche donne une superficie totale du bassin d'alimentation de 162.44 km², avec 94.6 km² de superficie de terrain non karstifiable et 67.84 km² de terrain karstique. La source donne naissance au ruisseau du Groin qui rejoint le Séran sur la commune d'Artemare 2.36 km à l'aval, après avoir reçu les eaux de l'Arvière, ruisseau de plus de 12 km de long (données Syndicat Mixte du Séran).

Il est à noter que la station de jaugeage dont nous utilisons les données au chapitre 7 est situé à Artemare proche de la confluence avec le Séran. Or, d'après les données de la DREAL (Banque Hydro et Hydroteel) la superficie du bassin d'alimentation de surface de la station de jaugeage du Groin est de 42 km². En l'absence de traçage démontrant la relation pérenne entre la vasque du Groin et le ruisseau du Groin, c'est à titre hypothétique et selon toute vraisemblance qu'il faudrait donc considérer comme superficie totale du bassin d'alimentation de la station de jaugeage l'ensemble bassin versant de la source du Groin (162.44 km²) plus le bassin d'alimentation de surface du ruisseau du Groin (42 km²) soit un total de 204.44 km². Subsiste également une incertitude concernant les deux sources de Saint Martin, affluentes directes du Séran, soupçonnées être l'exutoire pérenne du système karstique du Groin.



FIGURE 2.26 – Le trop plein de la source du Groin [photographie de Grinand 2010]

En surface, ce vaste système comporte aussi d'autres petits sous systèmes comme celui de la Grotte du Pic à Songieu, de l'Adoue ou de Chavillieu qui se développent dans les niveaux calcaires de l'Hauterivien et de l'Urgonien et alimentent le Séran. Une partie des eaux précipitées sur ce système sont drainées par un écoulement aérien (le Séran).

3 Conclusion

Le choix des systèmes karstiques pour l'étude de la vulnérabilité intrinsèque et de la vulnérabilité spécifique aux activités anthropiques a été basé à partir de plusieurs critères. Ils devaient être caractérisés par :

- un accès simple pour pouvoir prélever facilement des échantillons d'eau ;
- un bassin d'alimentation karstique boisé et peu anthropisé ;
- un équipement complet permettant de suivre en continu les débits, les températures et les conductivités ;
- des travaux de sylviculture programmés dans le bassin d'alimentation (hormis le site de Fontaine Froide qui n'a pas fait l'objet de travaux).

Pour l'étude de l'impact lié au changement climatique, le choix s'est porté sur trois sites possédant une longue série de données de débits.

Au final, les sept sites d'études sont bien représentatifs des milieux boisés de moyennes montagnes. Le site de La Roche Saint Alban et la source du Groin à Artemare caractérisent les systèmes des massifs jurassiens. Le Creux des Elaphes, le système karstique de Fontaine Noire et la rivière du Chéran représentent le massif des Bauges. Enfin, les systèmes karstiques des Echelles (ou Fontaine Froide) et de La Combe représentent le massif de la Chartreuse. Une synthèse des données des sites d'étude est présentée tableau 2.3 (le tiret dans le tableau correspond à des cas particuliers). Le bassin d'alimentation du Creux des Elaphes n'est pas définissable car le site correspond en une galerie karstique. La géologie de la rivière du Chéran ne peut pas se résumer rapidement car la rivière correspond à des eaux de surface qui traversent plusieurs types de faciès géologiques.

Les études réalisées pour l'impact des activités anthropiques s'inscrivent dans des années relativement chaudes par rapport à la normale. Ces trois années assez atypiques ont permis de caractériser le fonctionnement des systèmes karstiques afin de mieux comprendre les interactions sol/eau souterraine (voir Chapitre 4). Toutefois les sites retenus ont leurs propres caractéristiques que ce soit au niveau du faciès de leur aquifère, de leur taille ou encore de leur structure et développement.

Les sites du Chéran, de la source du Groin et de Bange - l'Eau Morte, utilisés pour déterminer l'effet d'un changement climatique sur la quantité et la qualité de la ressource en eau n'ont pas fait l'objet d'un suivi sur les 3 ans de thèse. Les données obtenues proviennent de la banque Hydro pour le Chéran et le Groin et des données personnelles de Mr. Lepiller pour celles de Bange - l'Eau Morte.

Tableau 2.3 – Synthèse des données des systèmes étudiés, le "-" correspond à des cas particuliers

site	Coordonnées L2 étendu	Bassin versant (km ²)	Géologie	Etude vulnérabilité	Type de suivi	Date du suivi
La Roche Saint Alban	x = 873 060 y = 2 075 500	8	Kimméridgien Valanginien	qualitatif quantitatif	continu ponctuel	07/2009-12/2011
La Combe Saint Cassin	x = 876 114 y = 2 065 165	2.5	Valanginien	qualitatif quantitatif	continu ponctuel	10/2009-12/2011
Fontaine Noire St Jean d'Arvey	x = 887 000 y = 2 074 220	3.5	Urgonien	qualitatif quantitatif	continu ponctuel	10/2009-12/2011
Les Echelles	x = 870 387 y = 2 054 675	13.95	Urgonien	qualitatif quantitatif	ponctuel	10/2009-12/2012
Bange L'Eau Morte	x = 892 970 y = 2 088 985	12.3	Urgonien	quantitatif	Banque hydro	01/1981-31/2002
Les Elaphes	x = 885 101 y = 2 081 536	-	Urgonien	qualitatif quantitatif	ponctuel	05/2011-07/2011
Source du Groin	x = 859 995 y = 2 102 736	67.84	Portlandien Valanginien	quantitatif	Banque hydro	01/1960-12/2011
Le Chéran	x = 893 163 y = 2 087 060	249	-	quantitatif	Banque hydro	01/1960-12/2011

Chapitre 3

Méthodologie d'acquisition et de traitement des données

Ce chapitre a été rédigé dans l'intention de faire le point sur les protocoles expérimentaux et les méthodes analytiques utilisées dans le cadre de la thèse. La description et l'explication des méthodes ont été ici définies pour l'impact des activités anthropiques sur la ressource en eau karstique. La méthode PaPRIKa utilisée dans le cadre de l'élaboration de cartes de vulnérabilité fait l'objet d'une description Chapitre 5. Le traitement des données des longues chroniques de débits, températures et précipitations pour étudier l'impact lié au changement climatique est traité Chapitre 7.

1 Mesures de terrain

1.1 Suivi aux émergences

L'étude à l'émergence des sources karstiques a été effectuée à deux niveaux de suivi temporel. Le protocole expérimental couplant les suivis continus et ponctuels des eaux et des sols est schématisé par la figure 3.1.

Le premier niveau est un suivi à haute fréquence nécessitant l'équipement des captages. Les débits, la conductivité, la température et la turbidité ont été mesurés toutes les heures. La fluorescence de la matière organique et la turbidité, par l'intermédiaire d'un appareil spécifique, le GGUN-FL30© [Schnegg 2002] ont aussi été mesurées à un pas de temps de 15 minutes. Le fluorimètre de terrain, ordinairement utilisé pour la détection de traceurs fluorescents, a été adapté pour détecter la matière organique naturelle fluorescente. Deux types de matière organique fluorescente sont visibles dans les eaux karstiques : le type humique et le type protéique. Pour cela, le fluorimètre possède le couple d'émission et d'excitation 250/400-700 nm pour les types protéiques et 310/300-700 nm pour le type humique. Les caractéristiques techniques du fluorimètre de terrain sont détaillées en annexe 4 et la validation des mesures est expliquée Chapitre 5.

Le deuxième niveau a consisté en un suivi par échantillonnage hebdomadaire à l'exutoire des eaux des systèmes karstiques. Chaque semaine, les concentrations des

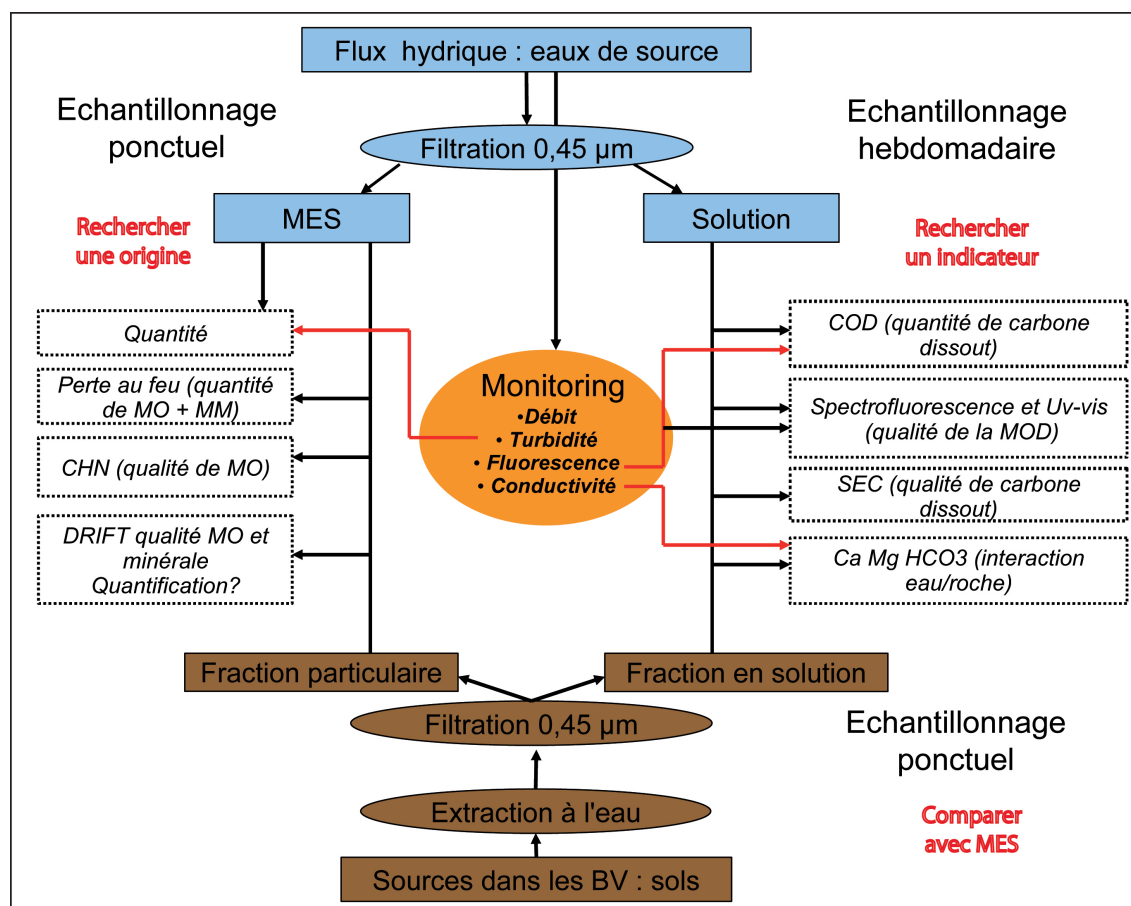


FIGURE 3.1 – Diagramme du protocole expérimental (d'après Dzikowski
Avec : CHN=Carbone Hydrogène Azote (N), COD=Carbone Organique dissout, DRIFT=Réflexion Diffuse Infrarouge à Transformée de Fourier (Diffuse Reflectance infrared Fourier Transform), MES=Matière En Suspension, MM=Matière Minérale, MO=Matière Organique, MOD=Matière Organique dissoute, SEC=Chromatographie d'Exclusion Stérique sur Colonne Sèche

éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- , le pH, la température et la conductivité ont été mesurés sur les eaux brutes. Après filtration à $0.45 \mu\text{m}$ les matières organiques fluorescentes dissoutes dans l'eau ont été caractérisées par un spectrofluorimètre (pour l'identifier) et par UV-vis (pour déterminer la part de matière organique susceptible d'émettre de la fluorescence). Un prélèvement ponctuel de 40 L d'eau a été effectué dans le but de récupérer les Matières En Suspension (MES), après décantation et filtration. Les matières en suspension sont identifiées semi qualitativement par une analyse infrarouge.

Les matières en suspension sont caractérisées de façon semi quantitative par des pertes au feu. Elles sont utilisées pour estimer le pourcentage de matière organique et de carbonate présent dans un échantillon. La matière organique brûle à 550°C et les carbonates à 950°C . Lors de crues importantes, une analyse ponctuelle complète a eu lieu pour déterminer la présence de bactéries (en particulier Entérocoques et Escherichia Coli), d'hydrocarbures, de HAP (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique) et mesurer les concentrations de vingt éléments majeurs.

1.2 Suivi des sols

Une première étape a été d'identifier les différents types de sol constituant les bassins d'alimentation de deux sources karstiques (La Roche Saint Alban et La Combe). En fonction du type de sols, des échantillons ont été prélevés, décrits et soumis aux analyses infrarouges. Des analyses de la teneur en matière organique et en carbonates ont été effectuées. En complément, l'acidité de réserve des échantillons de sol a été mesurée par estimation du pH (H_2O et KCl). La mesure du pH renseigne sur la teneur approximative des carbonates. La différence des deux mesures caractérise l'acidité du sol. Ainsi, si l'écart est inférieur à 0.5 alors le sol a une faible acidité de réserve, s'il est compris entre 0.5 et 1, l'acidité est moyenne et s'il est supérieur à 1 l'acidité de réserve est élevée. Le bassin versant du site de Saint Jean d'Arvey, n'a fait l'objet que d'une description des différents types de sol rencontrés.

1.3 Suivi de l'épikarst

Pour identifier le rôle de l'épikarst, seul le site du Creux des Elaphes a été étudié. Ainsi, six points d'écoulement par goutte à goutte ont fait l'objet de prélèvement au sein de la cavité karstique (voir la position des "P" et "E" Figure 2.20). Sur la période du 25 Mai au 4 Juillet 2011, les échantillons ont été récupérés tous les deux jours, puis toutes les semaines du 4 au 28 Juillet. Les échantillons d'eau ont été filtrés à $0.45\ \mu\text{m}$ pour séparer les éléments en suspension des éléments dissous. L'eau filtrée a été analysée au spectrofluorimètre et à l'UV-VIS pour identifier les matières organiques fluorescentes. Les matières en suspension ont été analysées par Infrarouge.

2 Mesures de laboratoire

2.1 Spectroscopie de fluorescence

La fluorescence s'observe quand les atomes ou les molécules excitées par l'absorption d'un rayonnement électronique ou photonique reviennent à leur état fondamental en libérant l'excès d'énergie sous forme de photon. Il existe trois niveaux d'énergie E_0 l'état fondamental, et les états excités vibratoires E_1 et rotationnels E_2 .

Principe de Franck Condon

Soumise à une excitation lumineuse dans le domaine visible, la molécule est portée à son premier état électronique excité E_1 . Son nuage électronique et la polarisation électronique des molécules environnantes du solvant s'établissent quasiment instantanément ; en revanche les positions des noyaux restent identiques à ce qu'elles sont dans la configuration de l'état fondamental. Cependant, la géométrie de l'état excité (E_1) n'est pas forcément la même que l'état fondamental (E_0). Le principe de Franck Condon [Franck 1926, Condon 1926, Coolidge *et al.* 1936] stipule aussi que le temps est très court, soit environ 10^{-15} s. L'activation d'une molécule peut être schématisée par le diagramme de Jablonski (Figure 3.2). Plus la longueur d'onde d'excitation est courte et plus le niveau d'énergie est élevé, la molécule passe alors de son état fondamental E_0 à un état d'excitation E_2 . Le retour à E_0 s'effectue selon

deux mécanismes la relaxation non rayonnante et la relaxation rayonnante.

La relaxation non rayonnante

La désactivation ou la relaxation vibratoire peut se produire entre molécules excitées et/ou des molécules de solvant. Le choc permet de transmettre ou de dissiper l'énergie provoquant une légère augmentation de la température [Skoog *et al.* 1997]. Il existe aussi, la conversion interne, chemin le plus probable pour la majeure partie des molécules. L'énergie absorbée est dissipée dans l'environnement par saut d'énergie en rotation ou vibration. Cette désactivation est d'autant plus facile que la température est grande [Skoog *et al.* 1997].

La relaxation rayonnante

La désactivation par fluorescence est un phénomène rare et ne concerne pas toutes les molécules [Skoog *et al.* 1997]. La perte d'énergie qui accompagne le retour à l'état fondamental se fait par émission d'un photon. Cependant, l'énergie des photons émis par désexcitation est plus faible, ceci s'explique par les chocs entre molécules qui entraînent une retombée de l'énergie à un niveau vibrationnel et rotationnel quelconque de l'état électronique fondamental. Ce déplacement vers de plus grande longueur d'onde (donc de plus faible énergie) est appelé déplacement de Stokes.

Il peut toutefois avoir un Passage Inter-Système (Inter Crossing System), ce chemin est particulier, puisqu'il nécessite un changement de spin de l'électron (le spin étant un moment cinétique intrinsèque d'une particule). En effet, l'état excité E_1 fait référence à l'état singulet de la molécule. La promotion de l'électron est tellement rapide que l'électron ne peut pas changer de spin. Une fois l'état excité atteint, la molécule peut passer d'un état singulet E_1 à un état triplet T_1 . La perte d'un photon lors de l'état T_1 pour retourner à l'état fondamental est appelé désactivation par phosphorescence [Skoog *et al.* 1997].

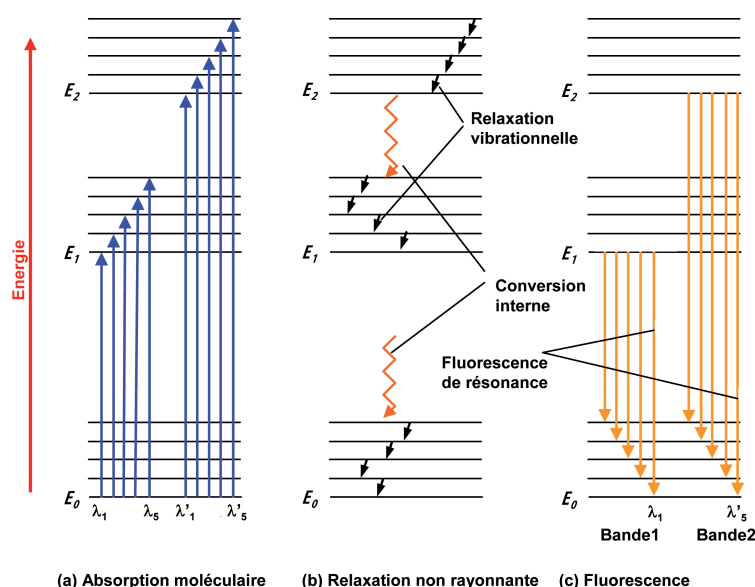


FIGURE 3.2 – Diagramme de Perrin-Jablonski

Autres types de processus de fluorescence :

◇ La diffusion Rayleigh [Lord Rayleigh 1894] est une diffusion dite élastique. Il s'agit de l'émission, à la même longueur d'onde, d'une petite fraction de la lumière excitatrice dans toutes les directions par le milieu dans lequel se trouve le composé.

◇ La diffusion Raman [Raman et Krishnan 1928] est de 100 à 1000 fois plus faible que la diffusion Rayleigh. Cet effet consiste en la diffusion inélastique d'un photon, c'est à dire le phénomène physique par lequel un milieu peut modifier légèrement la fréquence de la lumière qui y circule. Ce décalage en fréquence correspond à un échange d'énergie entre le rayon lumineux et le milieu. Cet échange peut avoir plusieurs causes : vibrations du cristal ou de la molécule, excitations magnétiques....

Les espèces fluorescentes

Les espèces capables d'émettre de la lumière après excitation sont appelées fluorochrome ou fluorophore [Carlsson and Waldeck 1958]. La plus part des molécules ne sont pas fluorescentes car leur structure est telle que la relaxation non rayonnante se produit plus rapidement que l'émission de fluorescence. Les composés qui contiennent des noyaux aromatiques produisent des émissions fluorescentes moléculaires plus intenses. Les composés carbonyles aliphatiques et alicycliques ainsi que les structures à double liaisons conjuguées sont fluorescentes mais moins nombreuses. Les espèces fluorescentes peuvent être des molécules biologiques telles que le Tryptophane ou la Tyrosine (acides aminés possédant un groupement aromatique) ou des indicateurs fluorescents étant des molécules organiques qui deviennent fluorescentes en présence d'un cofacteur Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , O_2 , pH...

Analyses spectrofluorimétriques

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser la spectrofluorométrie à balayage multiple. Les spectres d'émission peuvent ainsi être observés au cours d'une même analyse à diverses longueurs d'onde d'excitation.

Les spectres sont obtenus par un balayage synchrone des monochromateurs d'excitation et d'émission. Le premier laisse sortir un intervalle étroit centré autour de λ_{ex} . Le second laisse sortir un intervalle étroit centré autour de λ_{em} . λ_{ex} et λ_{em} représente la différence entre les deux longueurs d'onde et est fixé par l'opérateur. Le microprocesseur pilote ensuite la rotation simultanée des deux réseaux en maintenant un écart égal à $\Delta\lambda$ entre λ_{ex} et λ_{em} . Le spectrofluorimètre mesure alors l'intensité lumineuse émise aux différentes λ_{em} . L'allure des spectres dépend énormément de la valeur de λ_{ex} et λ_{em} . En résumé, un balayage avec un $\Delta\lambda$ petit améliore considérablement l'allure des spectres de mélanges ou de substances qui ont des spectres d'émission et d'excitation complexes.

Les Matrices d'Excitation et d'Emission (MEE) ont considérablement affiné la caractérisation des mélanges organiques en solution. Le spectrofluorimètre se cale sur une première longueur d'onde d'excitation λ_{ex} et met en mémoire un premier spectre d'émission. Il ajoute ensuite à λ_{ex} l'incrément programmé et met en mémoire un second spectre d'émission. L'incrément de λ_{ex} et l'enregistrement des spectres se poursuivent aussi longtemps qu'ils ont été programmés. Une famille de spectres

d'émission correspondant à des longueurs d'onde d'excitation graduellement augmentées sont alors mises en mémoire. Tous ces spectres apparaissent sur un même repère. Chacun se situe dans un plan parallèle, mais sa position sur la troisième dimension dépendra de la longueur d'onde d'excitation. Les spectres d'émission apparaissent donc décalés les uns par rapport aux autres donnant l'impression d'une image en trois dimensions [λ_{em} ; λ_{ex} ; Φ_f] (Figure ??). Ce type de spectre 3D, ou spectre de MEE, apporte de nombreux renseignements sur les composés fluorescents d'un mélange dans l'eau.

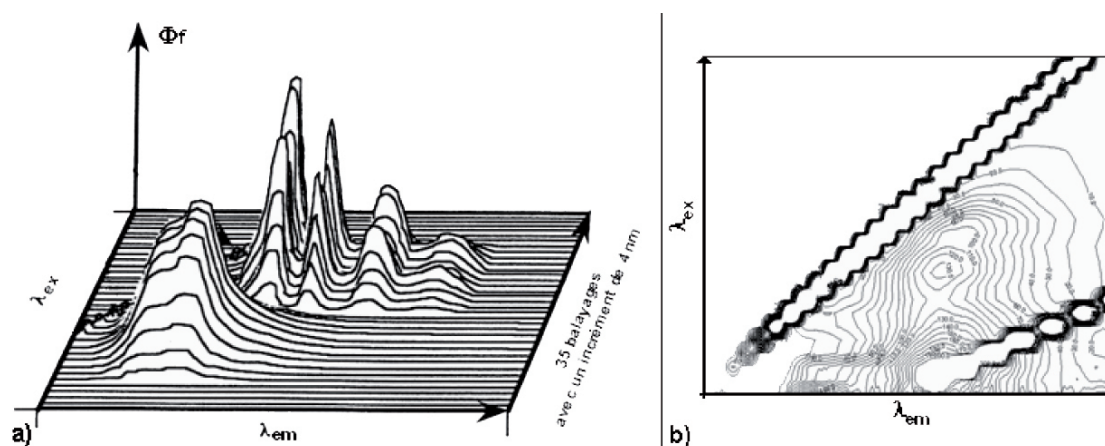


FIGURE 3.3 – Allure du spectre de MEE sous forme de pics (a), sous forme de courbes de niveau (b) [Blondel 2008]

Dans le cadre de la thèse les matrices d'émission et d'excitation ont été réalisées à l'aide du Cary Eclipse Varian. Les spectres ont été acquis dans une gamme d'excitation allant de 220 à 450 nm avec un pas de 10 nm. Pour chaque excitation, un spectre d'émission a été collecté entre 250 et 550 nm avec un pas de 1 nm. La taille des fentes optiques du spectrofluorimètre ont été choisies à 5 nm.

2.2 Spectroscopie UV-visible

Mesures d'absorption de lumière

La mesure de l'absorption (ou absorbance) d'une solution permet de recueillir des informations sur la conformation de la matière organique dissoute présente. L'absorbance spécifique, qui est la normalisation de la mesure d'absorbance par la teneur en carbone organique de la solution, est un paramètre "intensif" (indépendant de la quantité) de qualité de la matière organique. En particulier, l'absorption dans l'UV est liée à l'existence des transitions π - π' présentes dans les cycles benzéniques et plusieurs polyènes et est donc reliée à l'aromaticité des matières organiques [Traina *et al.* 1990].

L'absorption UV est la mesure d'absorption la plus courante pour la caractérisation de la matière organique. Le caractère aromatique de la matière organique est ainsi estimé par la mesure de l'absorbance spécifique (souvent noté SUVA, Specific UV Absorbance). La longueur d'onde utilisée se situe dans la gamme 254-280 nm.

L'absorption des solutions de matière organique dans le visible est aussi parfois étudiée. Chen et al [1976] ont montré que le degré d'humification de la matière organique dissoute pouvait être estimé par le rapport des absorbances E465/E665. Cependant, cet indicateur est surtout valide pour les matières organiques des sols et plusieurs études récentes montrent le manque de relation claire entre ce rapport d'absorbance et le degré d'humification de la matière organique dissoute [Peuravuori et Pihlaja 1997, Chen *et al.* 2002]. Aujourd'hui, la mesure de SUVA est utilisée en routine pour l'estimation simple et rapide de l'aromaticité de la matière organique [Leenheer et Croué 2003].

2.3 Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

La spectroscopie infrarouge est une méthode rapide permettant la caractérisation des groupements fonctionnels et des composants majeurs de différents échantillons. La méthode s'intéresse au nombre de liaisons chimiques spécifiques du constituant : O-H, N-H, C-H, etc. Lorsque la molécule reçoit de la lumière infrarouge à la fréquence où elle peut entrer en résonance, elle absorbe de l'énergie et l'amplitude de ses vibrations est légèrement augmentée. Le retour éventuel à l'état fondamental libère cette énergie sous forme de chaleur. Le domaine infrarouge compris entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} ($2.5 - 25\text{ }\mu\text{m}$) appartient au domaine d'énergie de vibration des molécules. Lors d'une analyse, la présence d'un pic correspond à une transition vibrationnelle et rotationnelle.

La spectroscopie infrarouge caractérise les molécules par leurs excitations vibrationnelles et rotationnelles. La molécule présente des vibrations d'élongation (stretching) et de déformation angulaire (bending); des bandes harmoniques, de combinaison et de différence peuvent également être observées. Les vibrations de liens de valence sont caractérisées par une variation de la distance entre les atomes selon l'axe de liaison. Les vibrations de déformation comportent des effets de cisaillement, de rotation, de balancement et de torsion [Pasto et Johnson, 1979; Silverstein *et al.*, 1991].

2.4 COT et NT-mètre

Le Carbone Organique Total (COT) a été mesuré à l'aide de l'analyseur Shimadzu TOC-Vcsn. L'analyse se fait en deux phases à haute température (180°C). Le carbone minéral est éliminé par ajout d'un acide fort et le carbone organique transformé en CO_2 gazeux par ajout d'un oxydant. Le CO_2 est ensuite analysé par un détecteur infrarouge non dispersif, qui convertit la masse de CO_2 en masse de COT.

Pour mesurer l'azote total présent dans un échantillon d'eau, il a été ajouté un détecteur d'Azote Total au COT VCSN. La mesure se réalise par Chimiluminescence en série. L'Azote total est oxydé en oxyde d'azote qui est mesuré après réaction chimique avec de l'ozone.

2.5 Fluorescence

L'utilisation de la fluorescence naturelle des molécules permet d'identifier une partie de la matière organique dissoute. L'emploi de matrice d'excitation et d'émission aide à l'identification de ces matières organiques (Figure 3.4).

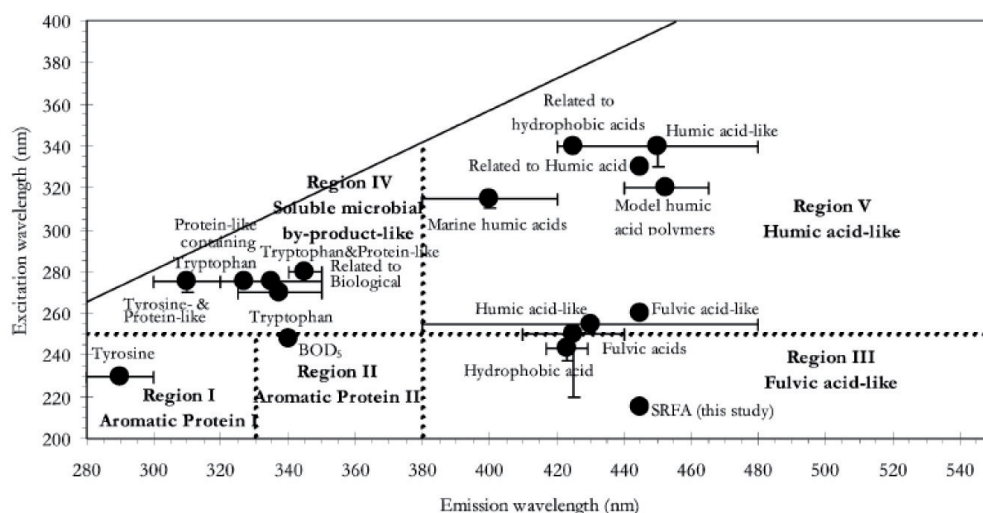


FIGURE 3.4 – Localisation des pics de matières organiques dans une matrice d'émission et d'excitation

On peut réduire les matières organiques dissoutes en deux régions de fluorescence :

- le type humique, représenté par les régions V et III (Figure 3.4), correspond à des « supra molécules » ;
- le type protéique, représenté par les régions I, II et IV, correspond à des petites molécules d'origine bactérienne ou produites par l'altération de molécules plus importantes

La fluorescence des matières organiques contenues dans les eaux karstiques a été étudiée selon deux méthodes : l'analyse PARAFAC et une méthode de modélisation du signal de fluorescence. La première méthode se base sur une décomposition tri linéaire, la deuxième sur une modélisation du signal en 2D. Les deux paragraphes qui suivent détaillent ces méthodes.

3.2.1 Analyse PARAFAC

Initialement développée par Harshman en psychométrie [Harshman 1970], l'analyse PARAFAC (Parallele Factor Analysis) est basée sur un algorithme de décomposition tri linéaire. Cette approche est aujourd'hui très populaire, grâce entre autres, aux nombreuses recherches actuelles de Bro [Bro 1997, Bro and Kiers 2003, Stedmon and Bro 2008] sur les MEE. Bien que la terminologie employée soit proche de celle de l'analyse factorielle bilinéaire classique, il existe de nombreuses spécificités à l'approche mutlinéaire. Depuis Harshman, on trouvera d'ailleurs une abondante littérature abordant PARAFAC d'un point de vue purement algébrique. La méthode consiste à combiner les MEE de plusieurs échantillons puis de rechercher le

nombre de composant ou fluorophore indépendant [Stedmon *et al.* 2003]. Ce modèle trinéaire consiste en une combinaison linéaire de trois variables a ; b ; c dépendant respectivement de i , j , k . L'erreur due à la mesure et au modèle encourage cependant à introduire un terme résiduel $e_{i,j,k}$ donnant l'équation suivante :

$$\forall i, j, k \quad x_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{in} b_{jn} c_{kn} + e_{i,j,k} \quad i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K \quad (3.1)$$

Avec $x_{i,j,k}$ = intensité de fluorescence du i^{eme} échantillon à la j^{eme} variable (emission mode) et à la k^{eme} variable (excitation mode) [Murphy *et al.* 2008]; a_{in} représente le facteur de fluorescence du fluorophore n dans l'échantillon i , b_{jn} la valeur du spectre d'absorption du fluorophore n à la longueur d'onde j , c_{kn} a valeur du spectre d'absorption du fluorophore n à la longueur d'onde k et $e_{i,j,k}$ le résidu du bruit de fond [Luciani *et al.* 2008].

Cette analyse permet d'estimer l'allure générale des spectres d'absorption et d'émission de chaque fluorophore ainsi que les rapports de concentration d'un fluorophore pour chaque échantillon (Figure 3.5).

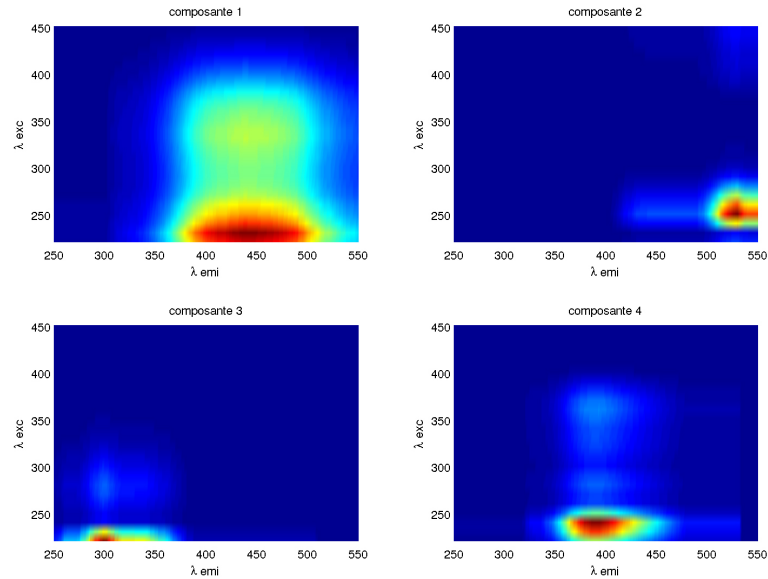


FIGURE 3.5 – Exemple de résultat obtenu par l'analyse PARAFAC

3.2.2 Interprétation du signal de fluorescence

Dans le but d'expliquer cette méthode, nous avons pris l'exemple de l'analyse des eaux de la source de La Roche Saint Alban. Les prélèvements d'eau sont filtrés à 0.45 μm puis sont analysés au spectrofluorimètre 3D (Figure 3.6). Les spectres d'excitation et d'émission de fluorescence [Mobed *et al.* 1996, Baker et Lamont-Black 2001, Chen *et al.* 2003a, Cory et McKnight 2005] permettent d'identifier les principales familles de substances organiques fluorescentes [Coble 1996, Parlanti *et al.* 2000, Zsolnay 2003]. L'analyse des substances de type humique et de type protéique s'effectue par le spectre d'excitation allant de 220 à 450 nm avec un pas de 10 nm et,

pour chaque excitation, un spectre d'émission collecté entre 250 et 550 nm avec un pas de 1 nm [Tissier *et al.* 011a].

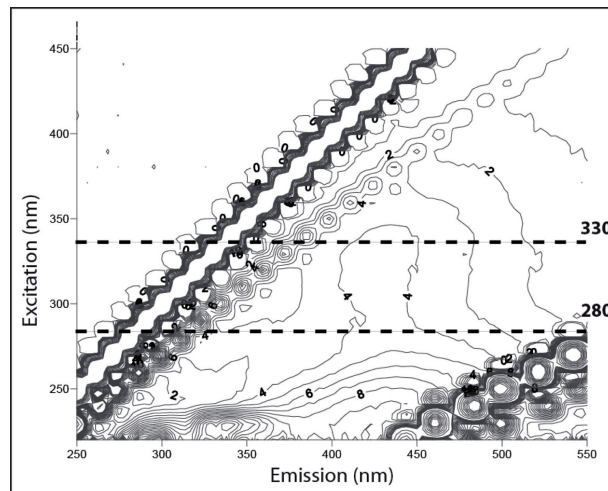


FIGURE 3.6 – Matrice d'émission et d'excitation, exemple du 16/06/2010 à La Roche Saint Alban

Pour caractériser les fluorophores, une décomposition du signal de fluorescence permet, par une longueur d'onde d'excitation, de mettre en évidence les fluorophores composants les pôles. Pour une longueur d'onde d'excitation choisie, le signal d'émission est décomposé en une somme de fonctions Log-Normales. Chaque fonction est définie par une moyenne et un écart type qui caractérise un fluorophore. La moyenne ou valeur centrale d'une des fonctions Log-Normales représente la longueur d'onde caractéristique d'émission d'un fluorophore ; l'écart type ou largeur, sa dispersion (FWHM (Full width at half maximum)). Chaque spectre d'émission est donc modélisé par la fonction $F(\lambda)$:

$$F(\lambda) = \sum_{i=1}^n f(\lambda_i) \quad (3.2)$$

Avec n = nombre de fluorophores et $f(\lambda_i)$ = fonction Log-Normale définit pour i^{eme} fluorophore par :

$$f(\lambda_i) = \frac{e^{0.5((\ln(\lambda_i) - \mu_i)/\sigma_i)^2}}{\lambda_i \sigma_i \sqrt{2\pi}} \quad (3.3)$$

Avec μ : la moyenne et σ : l'écart type

Les longueurs d'excitation choisies sont 330 nm pour identifier le type humique (HL dans la figure 3.7) et 280 nm pour caractériser le type protéique et le fluorophore lié aux activités microbiologiques (PL et PdB dans la figure 3.8). Cette dernière longueur d'onde a été choisie pour limiter les bruits des Ramans (biais possible pour les émissions ≤ 250 nm).

L'analyse du signal (Figure 3.7) permet d'identifier deux fluorophores caractérisant la matière du type humique. Le troisième fluorophore observé correspond à une

partie de la matière organique liée à l'activité microbiologique caractérisée par le pic d'émission à 383 nm [Chen *et al.* 2003b]. La décomposition du signal de fluorescence des 69 échantillons, prélevés de Mars 2010 à Aout 2011, donne pour les positions moyennes des fluorophores 421 ± 3.6 nm et 482 ± 5.9 nm avec pour les FWHM respectifs 77 ± 5 nm et 130 ± 5 nm. Le troisième fluorophore reste stable, lui aussi, avec une position moyenne de 383 ± 2.7 nm et un FWHM de 54 ± 6 nm.

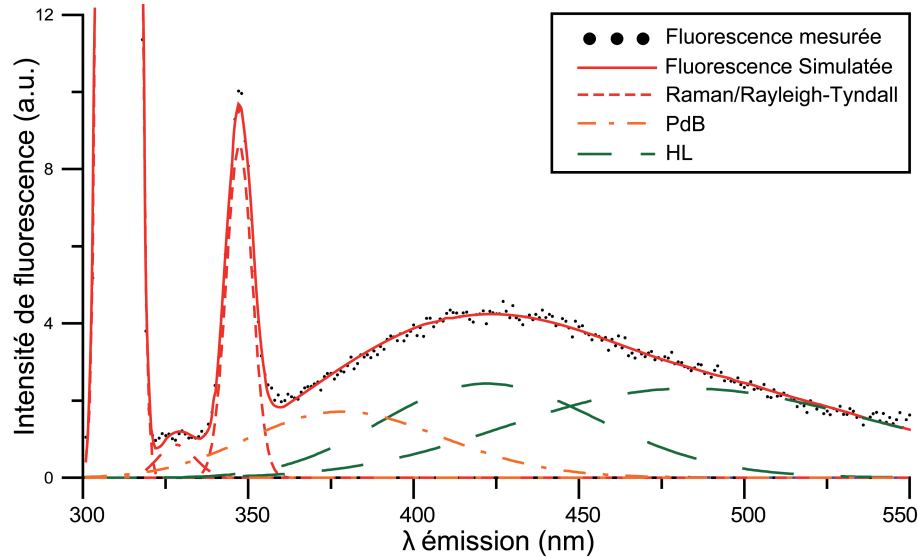


FIGURE 3.7 – Décomposition du signal d'émission pour une longueur d'excitation à 330 nm obtenue par fluorescence représentant l'intensité en fonction des longueurs d'ondes d'émission

Avec : *HL*=matière organique du type humique et *PdB*=matière organique issue de la production bactérienne

La longueur d'onde à 280 nm permet de caractériser les matières du type protéique [Hudson *et al.* 2008]. L'analyse de la bande d'émission (Figure 3.8a) permet d'identifier deux fluorophores du type protéique. Le type tryptophane 280/325-365 nm et le type tyrosine 280/305-335 nm [Coble 1996].

La décomposition du signal de fluorescence de 69 échantillons, donne une position moyenne du fluorophore du type tyrosine à 320 ± 1.9 nm avec un FWHM de 29 ± 2.8 nm et la position du fluorophore du type tryptophane à 345 ± 1.5 nm avec un FWHM de 45 ± 2.9 nm.

Le troisième fluorophore observable (Figure 3.8) possède le couple d'excitation/émission 280/350-420 nm. Il présente une position moyenne à 383 ± 1.6 nm et un FWHM de 72.7 ± 3.7 nm.

L'origine la plus probable de ce fluorophore serait liée à une activité microbiologique associée à des conditions d'eaux stagnantes ou de forte humidité des sols. Le dernier signal modélisé correspond à une partie des fluorophores du type humique caractérisé par le pic d'émission à 450 nm [Chen *et al.* 2003a]. La position moyenne est de 450 ± 5 nm et un FWHM de 171 ± 8 nm.

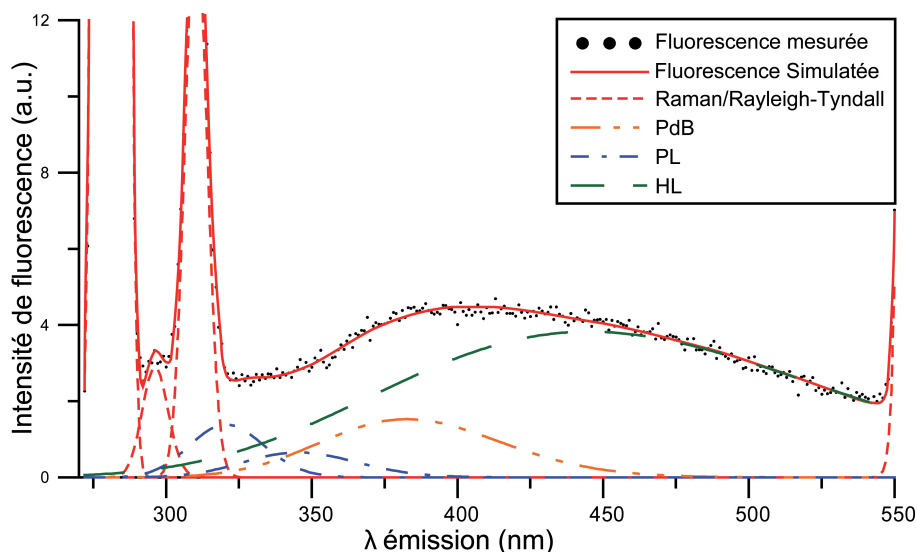


FIGURE 3.8 – Décomposition du signal d'émission pour une longueur d'excitation à 280 nm obtenue par fluorescence représentant l'intensité en fonction des longueurs d'ondes d'émission

Avec : *HL*=matière organique du type humique, *PdB*=matière organique issue de la production bactérienne et *PL*=matière organique du type protéique

Les études de l'eau par la fluorescence ont permis de mettre en évidence quatre pôles de fluorescence qui apparaissent sur tous les sites. Les caractéristiques de ces fluorophores sont rappelées dans le tableau 3.1 :

Tableau 3.1 – Caractéristiques des fluorophores retrouvés dans les eaux karstiques

Type	Excitation (nm)	Position moyenne d'émission (nm)	FWHM (nm)
Tyrosine	280	320 ± 1.9	29 ± 2.8
Tryptophane	280	345 ± 1.5	45 ± 2.9
Produit microbio.	280	383 ± 1.6	72 ± 5
Humique	330	421 ± 3.6	77 ± 5
		482 ± 5.9	130 ± 5

3.2.3 Comparaison des deux méthodes

Pour comparer les deux méthodes, nous avons utilisé les données des MEE obtenues sur les sites de La Roche Saint Alban (RSA) et de La Combe (SC) sur la période 2009-2011. Les mesures d'intensité déterminées par l'analyse PARAFAC et la modélisation du signal de fluorescence permettent de faire ressortir les mêmes massifs composant la matière organique fluorescente. Les trois types de fluorophore ont leurs intensités de fluorescence mesurées par les deux approches représentées sur la figure 3.9. Ce rapprochement nous permettra de choisir quelle méthode est la plus fiable pour l'étude des systèmes karstiques.

Les mesures d'intensité des matières du type humique sont représentées sur la figure 3.9A. Nous observons que pour la source de La Roche Saint Alban (RSA) et

de La Combe (SC), les deux approches identifient de façon similaire les matières du type humique avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0.94.

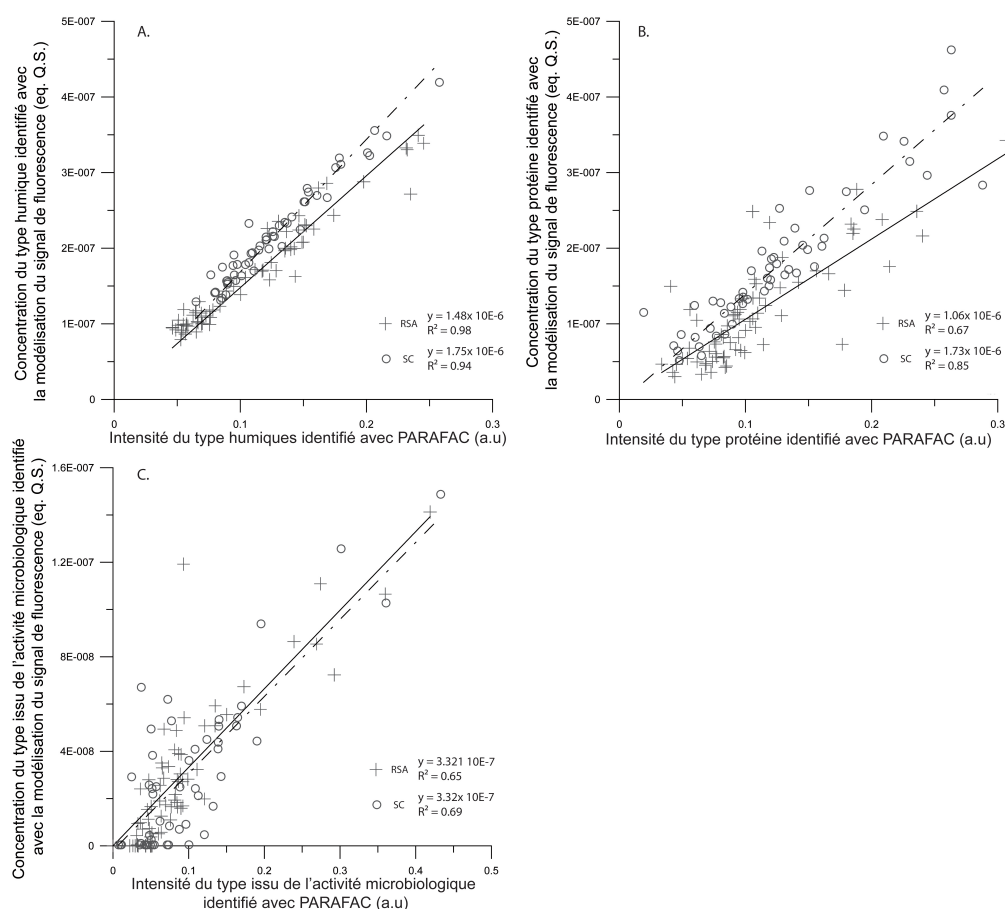


FIGURE 3.9 – Comparaison des résultats entre l'analyse PARAFAC et la méthode de modélisation du signal de fluorescence des matières organiques du type (A) humique, (B) protéique et (C) issue de la production bactérienne

Les mesures d'intensité des matières organiques du type protéinique (Tyrosine-like et Tryptophan-like (Tableau 3.1) sont représentées sur la Figure 3.9B. Les relations entre les deux méthodes sont moins précises ($R^2=0.67$ pour RSA et $R^2=0.85$ pour SC). Cette faible corrélation peut être expliquée par le traitement des matrices pour l'analyse PARAFAC. Au cours de l'analyse, nous simplifions le spectre en s'affranchissant des Ramans. Lors de cette suppression, il est possible qu'une partie du fluorophore du type protéinique soit supprimée aussi.

Les mesures d'intensité de la matière organique issue de la production bactérienne (Figure 3.9C) présentent la moins bonne corrélation avec un $R^2=0.65$. Nous supposons, que lors du choix du nombre de composant l'analyse PARAFAC discrimine moins bien les massifs de fluorescence du type humique avec les matières issues de la production bactérienne lors de l'analyse.

Nous avons décidé d'utiliser préférentiellement la méthode de modélisation de fluorescence pour l'étude de la matière organique fluorescente, car nous la considé-

rons comme plus précise.

2.6 Infrarouges

3.3.1 Reconnaissance des pics d'absorption

La spectroscopie infrarouge est une méthode rapide permettant la caractérisation des groupements fonctionnels et des composantes majeures de différents échantillons. Afin de caractériser les différents constituants, une analyse complète d'un spectre a été réalisée à partir des travaux d'Arcan (1968) et de Maglione et Carn (1975).

Sur le spectre sont caractérisés grâce à ce spectre (Figure 3.10) :

- les carbonates (en bleu sur la figure 3.10) ;
- la matière organique par les groupements $-OH$, CH_2 et $-CH_3$ ainsi que les $C-O$ (en noir sur la figure 3.10) ;
- les argiles et les silicates (en rouge sur la figure 3.10). Ce spectre servira de référence pour les analyses des sols des bassins versants et des sédiments de La Roche Saint Alban et de La Combe.

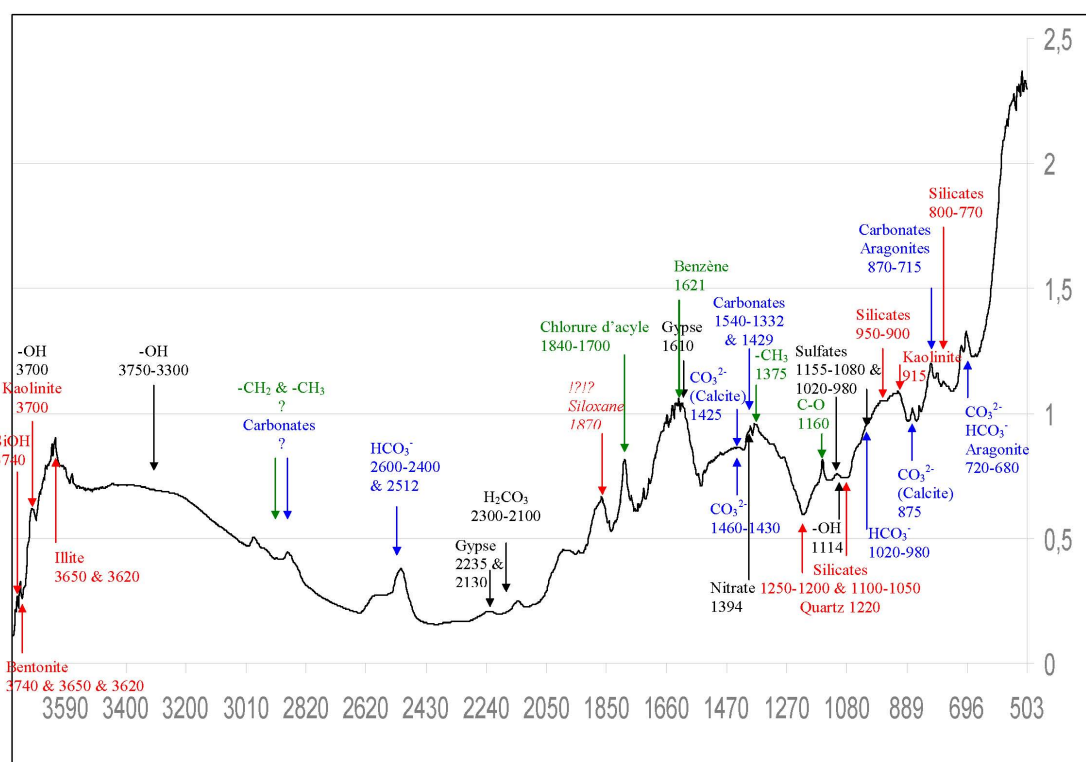


FIGURE 3.10 – Exemple d'une analyse d'un spectre infrarouge

3 Conclusion

Le protocole mis en place permet d'identifier les vulnérabilités intrinsèques et spécifiques des systèmes karstiques des moyennes montagnes. Il a été appliqué sur la période 2009 - 2011.

Dans un premier temps, nous avons défini la vulnérabilité intrinsèque des systèmes karstiques étudiés. Pour cela, nous avons suivi en continu les débits, la conductivité et la température des eaux des émergences karstiques. Le but de ce suivi était d'obtenir suffisamment de données afin de déterminer le fonctionnement (temps de réponse) et de caractériser le développement (en fonction des courbes de récessions) des différents systèmes karstiques (la description du fonctionnement et de la caractérisation des systèmes karstiques de moyennes montagnes sont détaillées chapitre 4).

Puis dans un second temps, nous avons cherché à déterminer des indicateurs pertinents pouvant caractériser des impacts liés à la sylviculture. Pour cela, nous avons couplé un suivi hebdomadaire du COT, du Nt, des matières en suspension et dissoutes, des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^-), de l'UV-vis et des matières organiques fluorescentes dans les eaux karstiques avec des suivis en continu. Le suivi continu classique a été complété par l'utilisation d'un fluorimètre de terrain permettant la détection des matières organiques fluorescentes.

Cette étude s'est effectuée en deux étapes. Tout d'abord, nous avons réalisé un état de référence pour connaître l'évolution des différents paramètres choisis sur un cycle hydrologique. Ce premier bilan permet de caractériser, en fonction des périodes hydrologiques, les venues et les origines des matières dissoutes et en suspension des eaux des systèmes karstiques.

Enfin, nous avons étudié l'évolution des paramètres définis pendant et après les travaux toujours par des suivis hebdomadaires et continus.

Toutefois, l'intégralité du protocole (Figure 3.1) n'a pas pu être respecté sur la période 2009 - 2011. En effet, la chromatographie d'exclusion stérique (SEC) n'a pas été réalisée que sur une courte période (Décembre 2009 à Mai 2010). La faible quantité de données ne peut pas être actuellement exploitée.

Chapitre 4

Etudes des systèmes karstiques

1 Caractérisation et comparaison des fonctionnements des systèmes étudiés

1.1 Fonctionnement hydrodynamique

1.1.1 Relation Pluie - Débit

L'analyse corrélatrice met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps croissants. Cette analyse peut porter sur l'étude de la dépendance qui existe entre les événements d'une même chronique d'entrées ou de sorties (corrélogramme simple) ou bien entre les événements de la chronique des sorties en fonction de ceux de la chronique des entrées (corrélogramme croisé).

Pour tester une série temporelle, il est possible de la comparer avec elle-même en la décalant progressivement. Le degré de ressemblance d'une série avec la même série décalée est déterminé au moyen de la fonction d'autocorrélation définie comme la corrélation linéaire entre les valeurs des deux séries. Pour chaque décalage, le coefficient de corrélation est reporté en fonction du décalage ; c'est le corrélogramme simple qui met en évidence l'éventuelle nature cyclique de la série [Grasso 1999].

La fonction d'autocorrélation est donnée par la formule suivante [Jenkins et watts 1968, Box et Jenkins 1970, Mangin 1984, Grasso 1999] :

$$r_k = \frac{C_k}{C_0}; \quad C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n-k} f(i)(x_i - \bar{x}) * (x_{i+k} - \bar{x}) \quad k = 0, 1, 2, \dots, m \quad (4.1)$$

Avec "N" le nombre d'observation de la série temporelle ;
et "m" le décalage maximum de la série par rapport à elle même.

L'analyse corrélatrice simple des débits (Figure 4.1) permet d'obtenir l'effet mémoire à $r(k)=0.2$. Elle donne une idée des réserves en eau et de la karstification des systèmes étudiés. Plus l'effet mémoire est important et plus le débit est régulé par un stockage dans les réserves de l'aquifère. Pour La Roche Saint Alban, la courbe montre une décroissance lente et la valeur $r(k)=0.2$ est obtenue à partir de 60 jours.

Ce résultat met en évidence un système très inertiel, possédant un filtrage important, et ayant un degré de karstification moyen. Les courbes de La Combe et de Bange - l'Eau Morte atteignent la valeur $r(k)=0.2$ respectivement à partir de 10 et 15 jours. Les réserves des systèmes sont donc moins importantes contrairement à leur karstification plutôt bien développée. Les systèmes de Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey et de la source du Groin sont très peu inertiels, leur degré de karstification est important mais les réserves sont très faibles. Ce résultat est souligné par la valeur $r(k)=0.2$ obtenue au bout de 5 jours.

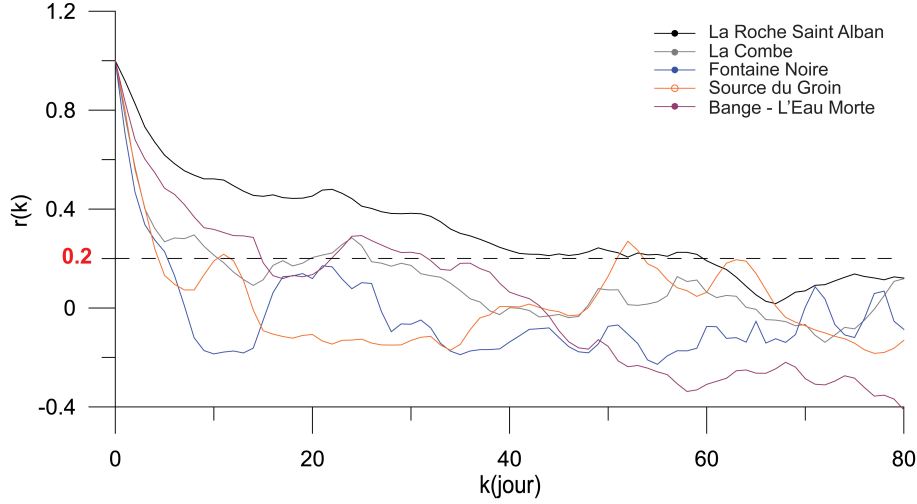


FIGURE 4.1 – Corrélogramme simple Débit-Débit (journalier)

L'analyse corrélatoire croisée définit une fonction de corrélation entre deux séries finies différentes. Elle représente les corrélations existant entre les entrées (x) et les sorties (y) du système pour des pas de temps positifs ou négatifs croissants (décalage des séries).

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{S_x * S_y} \quad \text{avec} \quad C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}) * (y_{i+k} - \bar{y}) \quad (4.2)$$

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{S_x * S_y} \quad \text{avec} \quad C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} y_i - \bar{y}) * (x_{i+k} - \bar{x}) \quad (4.3)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{et} \quad S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.4)$$

L'analyse par corrélation croisée des débits et des précipitations (Figure 4.2) sur une chronique d'un an pour les trois sites montre que la réponse impulsionnelle est très rapide. En effet, les courbes obtenues montrent un pic positionné au même instant pour La Combe et Fontaine Noire signifiant que la crue arrive moins de 2 jours après les précipitations. Pour les sites de La Roche Saint Alban et de la source du Groin, les pics apparaissent légèrement décalés, la réponse aux précipitations est donc légèrement plus tardive.

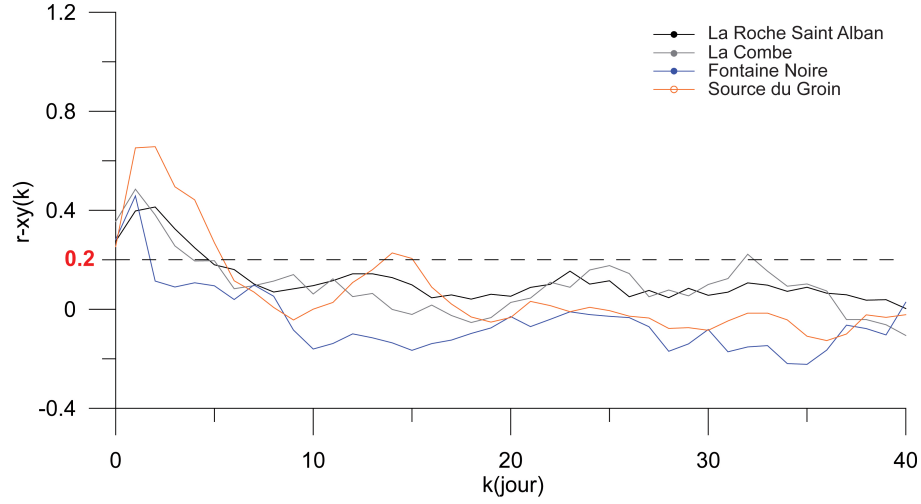


FIGURE 4.2 – Corrélogramme croisé Pluie-Débit

1.1.2 Analyse du tarissement

a. Principe de la méthode

L'analyse du tarissement repose sur la décomposition de l'hydrogramme de crue résultant de la vidange d'un système conceptualisé par un modèle double réservoirs indépendants (Figure 4.3). Un premier réservoir caractérise la décrue, il correspond à la vidange de la zone noyée en régime influencé, soit tant que l'infiltration se poursuit. Le second réservoir représente le tarissement, c'est à dire lorsque la pluie a cessé et que la zone d'infiltration n'alimente plus la zone noyée [Marsaud 1997].

La courbe de récession peut être ajustée avec la formule :

$$Q_t = \Psi_t + \Phi_t \quad (4.5)$$

Pour la décrue l'ajustement peut se faire au moyen d'une fonction homographique du type :

$$\Psi = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad (4.6)$$

Pour ajuster le tarissement une décroissance exponentielle peut être proposée, telle que :

$$\Phi_t = Q_{R0} e^{-\alpha t} \quad (4.7)$$

L'équation finale est donc :

$$Q_t = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} + Q_{R0} e^{-\alpha t} \quad (4.8)$$

La méthode, initialement proposée par Mangin en 1975, permet d'estimer pour un système karstique les paramètres suivants :

- t_i , l'instant où cesse l'infiltration rapide après le pic de crue. Il peut donc être assimilé à temps moyen d'infiltration ;
- α , le coefficient de tarissement rendant compte de l'inertie du système. Classiquement, les valeurs de α vont de 10^{-3} j^{-1} pour un système très inertiel, mal drainé, donc peu karstifié, à 10^{-1} j^{-1} pour un système peu inertiel, donc très karstifié. Dans

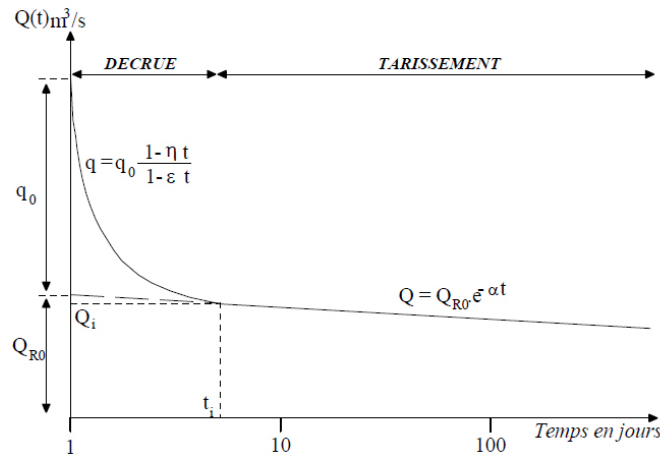


FIGURE 4.3 – Décomposition de la récession

les régions pré alpines, les systèmes possédant un coefficient de tarissement inférieur à $3.10^{-2} j^{-1}$ sont considérés comme ayant des exutoires pérennes (Marsaud 1997) ;

- η , le coefficient d'infiltration estimant de façon qualitative la vitesse d'infiltration. η varie théoriquement entre 0 et 1, l'infiltration est d'autant plus rapide que η tend vers 1 ;

- ε , le coefficient d'hétérogénéité de l'écoulement caractérisant la vitesse d'infiltration. Lorsque ce coefficient est élevé (1 à 10), l'infiltration rapide prédomine, alors que s'il est faible (0.01 à 0.001), l'infiltration est lente et/ou un aquifère épikarstique influe sur la vitesse d'infiltration ;

- V_{dyn} , le volume dynamique. Il caractérise le volume d'eau en mouvement du début de la crue jusqu'au tarissement, et dont l'écoulement fixe le débit Q_0 à l'exutoire. $Q_0 = q_0 + QR_0$ avec q_0 le débit d'infiltration à l'instant t_0 marquant le pic de crue et QR_0 le débit de tarissement à l'instant du pic de crue ;

- i , traduit les retards à l'infiltration. Il correspond à la valeur de la fonction homographique deux jours après le maximum de crue. Une forte valeur de i est significative d'une infiltration lente ou de l'influence d'un aquifère épikarstique, alors qu'une valeur faible est le signe d'un transit rapide des eaux vers la zone noyée [Mangin 1979] ;

- k , ce coefficient explique le pouvoir régulateur d'un aquifère. Il se rapporte à l'importance du karst noyé, et traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et les restituer progressivement au cours du temps. Dans le domaine karstique, k est généralement inférieur à 0.5. Une valeur tendant vers 0 indique un pouvoir régulateur faible.

Les différents paramètres obtenus pour les systèmes sont reportés dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 – Paramètres issus de l’analyse des courbes de récession

site	Paramètres de récession des crues									
	Coefficient de la fonction homographique $y(t)$					Retard à l’infiltration	Pouvoir régulateur	Coefficient de la fonction de Maillet $j(t)$		
	Q_0 $L.s^{-1}$	q_0 $L.s^{-1}$	t_i (j)	η (j^{-1})	ε (j^{-1})	I	K	QR_0 $(L.s^{-1})$	α	V_{dyn} (m^3)
La Roche Saint Alban	280	225	10	0.10	1.15	0.21	0.15	55	0.014	350 000
La Combe Saint Cassin	180	157	8	0.135	1.7	0.183	0.051	25	0.026	80 000
Fontaine Noire St Jean d’Arvey	380	355	9	0.111	2.9	0.157	0.05	24	0.044	50 000
Fontaine Froide	?	?	4	0.58	0.68	0.42	0.094	?	0.019	335 000
Bange L’Eau Morte	?	?	10	0.10	4.4	0.08	0.02	?	0.02	211 000
Source du Groin	16 660	15 800	7.2	0.146	1.6	0.187	0.005	790	0.145	470 000

b. Interprétation des paramètres

Pour les six sites étudiés, l’infiltration rapide cesse entre 7 et 10 jours. Seul le site de Fontaine Froide aux Echelles présente un arrêt de l’infiltration rapide au bout de 4 jours. Cette faible valeur provient de l’analyse réalisée à partir d’une modélisation de la récession [Catalogne and Routin 2006]. Globalement, les sites ont un coefficient de tarissement (α) élevé de l’ordre du 10^{-2} , le site des sources du Groin est le moins inertiel avec un coefficient α de 0.145. Des coefficients d’infiltration (η) courts de l’ordre du $10^{-2} j^{-1}$ et des coefficients d’hétérogénéité (ε) très élevé de 1 à $4 j^{-1}$ traduisent le caractère bien drainé de ces systèmes karstiques. Les volumes dynamiques (V_{dym}) montrent des valeurs différentes selon les sites. Les systèmes de La Roche Saint Alban, de Fontaine Froide, de la source du Groin et de Bange - l’Eau Morte montrent les plus gros volumes écoulés (avec respectivement 350 000 m^3 , 355 000 m^3 , 211 000 m^3 et 470 000 m^3) et possèdent donc des réserves beaucoup plus importantes que celles des sites de La Combe (80 000 m^3) et de Fontaine Noire (50 000 m^3). Pour comparer les volumes écoulés entre les sites, le rapport volumes dynamiques / taille du bassin d’alimentation (appelé volume dynamique spécifique) a été réalisé Tableau 4.2.

Tableau 4.2 – Volume dynamique spécifique

site	Taille du BA (km^2)	Volume dynamique spécifique ($m^3.km^{-2}$)
RSA	8	43 750
LC	2.5	32 000
SJA	3.5	14 300
ECH	13.95	25 450
BEM	12.3	17 150
SG	67.84	6 900

Avec *RSA*=Roche Saint Alban, *LC*=La Combe, *SJA*=Fontaine Noire à Saint Jean d’Arvey, *ECH*=Fontaine Froide aux Echelles, *BEM*= Bange - l’Eau Morte et *SG*=source du Groin à Artemare

Rapportés à la surface du bassin d'alimentation, les volumes d'eau en mouvement du début de la crue jusqu'au tarissement sont plus importants sur les sites de La Roche Saint Alban et de La Combe. La source du Groin, bien qu'ayant le volume dynamique moyen le plus important et les plus forts débits, possède le volume dynamique spécifique le plus faible.

À partir des valeurs moyennes des paramètres η , ε et V_{dyn} , les valeurs de k et i sont reportées dans le diagramme de Mangin (Figure 4.4). Ce diagramme met en évidence la similitude entre les systèmes de La Combe, de Fontaine Noire, de Bange - l'Eau Morte et de la source du Groin. Ils font partie des systèmes karstiques possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante. Le système de La Roche Saint Alban se caractérise par des réseaux spéléologiques bien développés débouchant en aval sur un important karst noyé. Enfin, la source de Fontaine Froide est un système plus karstifié à l'amont qu'à l'aval, caractérisé par des retards à l'infiltration.

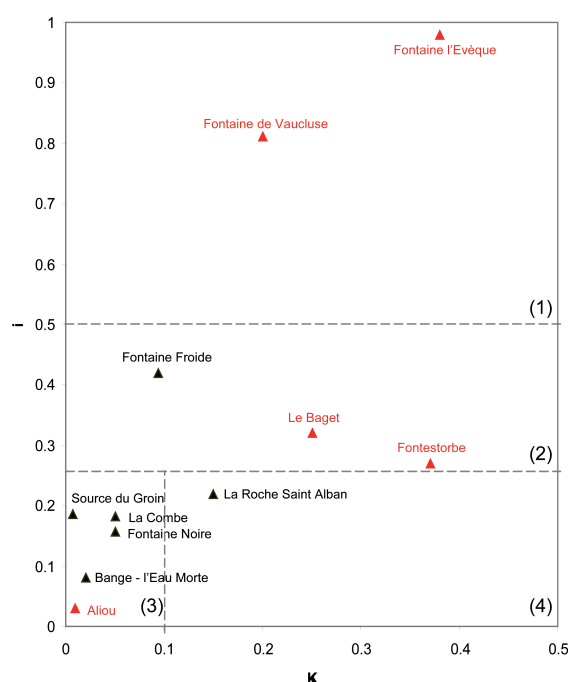



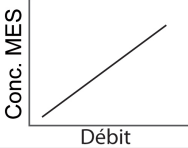
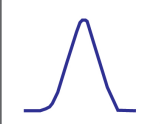

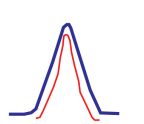

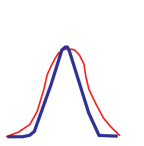
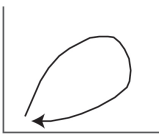
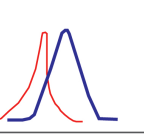
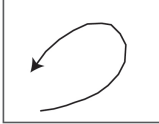
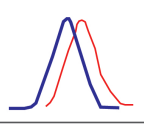

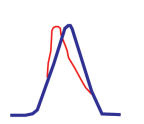

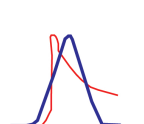
FIGURE 4.4 – Classification des systèmes karstiques dans le diagramme de Mangin
 1 : Systèmes complexes ; 2 : Systèmes plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval, avec des retards à l'alimentation ; 3 : Systèmes karstiques possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ; 4 : Réseaux spéléologiques bien développés débouchant en aval sur un important karst noyé.

1.1.3 Analyse des courbes d'hystérésis

Principe :

Les courbes d'hystérésis permettent de connaître l'évolution d'un paramètre en fonction d'un autre. Pour étudier ce type de courbe, il faut que les paramètres partent

d'une valeur initiale, qu'ils évoluent au cours du temps puis qu'ils reviennent (plus ou moins) à leur valeur initiale. Nous nous attacherons, ici, aux relations débit - turbidité de quelques crues. Les formes des courbes d'hystérésis débit-turbidité et leurs interprétations ont été initialement décrites pour les rivières [Williams 1989]. Ces travaux furent plus tard appliqués aux systèmes karstiques [Valdes *et al.* 2005, Lefrançois *et al.* 2007]. L'inventaire des différentes formes pouvant être rencontrées se trouve dans la Figure 4.5.

Cl.	Type de Relation	Illustration		Interprétation
				
1	a. Rectiligne			<ul style="list-style-type: none"> - Crues de transport des matériaux (1) - Matériaux désolidarisés des berges et déjà érodés (2) - Après des crues où les particules fines sont parties (3) - Arrivée continue de matériaux selon débit et granulométrie (3)
	b. Curviligne convexe			
	c. Curviligne concave			
2	Boucle horaire			<ul style="list-style-type: none"> - Remise en suspension puis érosion et dilution (4) (1) - Epuisement du stock de sédiment (2) (1) - Particules des zones proches du corridor (8)(7)(6)(5)(2)(1)
3	Boucle anti-horaire			<ul style="list-style-type: none"> - Sources lointaines (9)(7)(6)(2) - Après un grand événement pluvieux qui a tout enlevé (3) - Différence de vitesse entre onde de particule et onde d'eau (3)
4	Rectiligne plus boucle			<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison des classes 1 et 2 (5) - Dépend de la disponibilité du stock et du transport de MES (5)
5	Figure en huit			<ul style="list-style-type: none"> - Combinaison des classes 2 et 3 (5) - Dépend de la disponibilité en particules, et des débits (5)

(1) Jansson 2002; (2) Lenzi et Lorenzo 2000; (3) Hudson 2003; (4) Picouet et al. 2003; (5) Williams 1989; (6) Orwin et Smart 2004; (7) Seeger et al. 2004; (8) Klein 1984; (9) Brasington et Richards 2000

FIGURE 4.5 – Allure des différentes hystérésis et leurs significations [in Lefrançois *et al.* 2007]

Application :

Nous avons réalisé pour le site de La Roche Saint Alban une étude des courbes d'hystérésis turbidité - débit sur trois crues distincts (Figure 4.6). La première analyse a été effectuée sur la crue du 24/08/09 - 03/09/09, caractéristique d'une crue d'été (en noir sur la figure 4.6). La courbe montre une forme en 8, la première boucle est réalisée de façon anti horaire ou encore orthograde (type 5 sur la figure 4.5). Ce mouvement signifie que les premières arrivées en eau ne contiennent pas de turbidité. La seconde boucle montre une forme horaire (ou prograde), la tendance s'inverse, le débit continue à augmenter mais la teneur en turbidité augmente plus rapidement. Il existe donc une reprise des matières en suspension et dissoutes d'origine endokarstique.

La deuxième analyse a été réalisée sur une crue ayant eu lieu du 30/05/10 au 15/06/10, caractéristique d'une crue de printemps (en bleu sur la figure 4.6). Du fait de l'échelle logarithmique de l'axe de la teneur en turbidité, la courbe est un peu écrasée, toutefois elle montre une forme anti horaire (type 3 sur la figure 4.5). Il existe un décalage entre l'onde de crue affectant la masse d'eau et le transfert des sédiments plus lents.

Enfin, la dernière courbe caractérise la crue du 24/10/10 au 07/11/10, typique d'une crue d'automne (en rouge sur la figure 4.6). Cette fois ci, la boucle formée est horaire (type 2 sur la figure 4.5), l'accroissement plus rapide de la turbidité par rapport aux débits peut être due à la remise en suspension des sédiments non évacués et accumulés dans le karst.

En fonction du régime hydrologique, l'apport des sédiments sera différent pour le site de La Roche Saint Alban. Ces transports différents de matières seront pris en compte pour l'étude de l'impact des activités sylvicoles sur le bassin d'alimentation du système karstique.

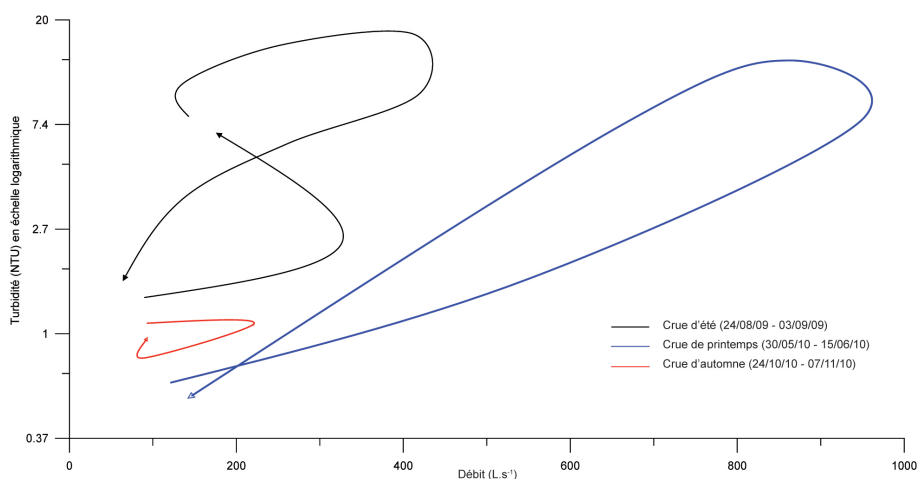


FIGURE 4.6 – Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit sur 3 périodes hydrologiques de La Roche Saint Alban

Les crues de La Combe à Saint Cassin ont aussi fait l'objet d'étude des courbes d'hystérésis turbidité - débit. La courbe de la crue du 24/08/09 au 03/09/09, est une crue avec deux arrivées d'eau successives. La première arrivée (Noté 1 sur la courbe noire figure 4.7) possède une forme horaire suivi d'une deuxième petite boucle horaire

signifiant que les sédiments ont une origine endo karstique. La deuxième venue en eau montre une boucle anti horaire (type 3 sur la figure 4.5), les sédiments de la seconde venue en eau sont donc d'origine exo karstique.

La deuxième analyse a été réalisée sur une crue de printemps (en bleu figure 4.7) ayant eu lieu du 30/05/10 au 15/06/10. La courbe montre une boucle anti horaire caractérisant une venue exo karstique des sédiments (type 3 sur la figure 4.5).

Enfin la dernière crue, caractérisant l'automne et datée du 24/09/10 au 03/10/10 (en rouge figure 4.7), montre une double boucle de forme anti horaire. Ce phénomène semble définir une double venue en sédiments exo karstiques au cours de la crue.

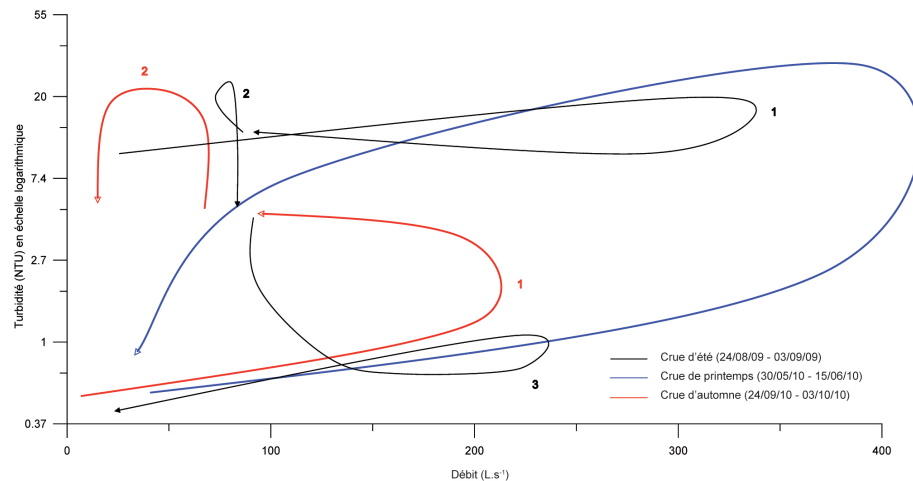


FIGURE 4.7 – Courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit sur 3 périodes hydrologiques de La Combe

Le dernier site à avoir fait l'objet d'analyse de courbe d'hystérésis est la source de Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey (Figure 4.8). Globalement pour cette source, les venues des sédiments ont toujours une origine exokarstique, définies par des boucles de sens anti horaire. La seule grande différence entre les périodes hydrologiques est le nombre de venue de ces sédiments. En effet, pour la crue de printemps (en bleu sur la figure 4.8), nous pouvons compter cinq venues (surement dues à des fontes de neige localisées) contre deux venues pour la crue d'été (en noir sur la figure 4.8) et enfin une seule pour la crue d'hiver (en rouge sur la figure 4.8).

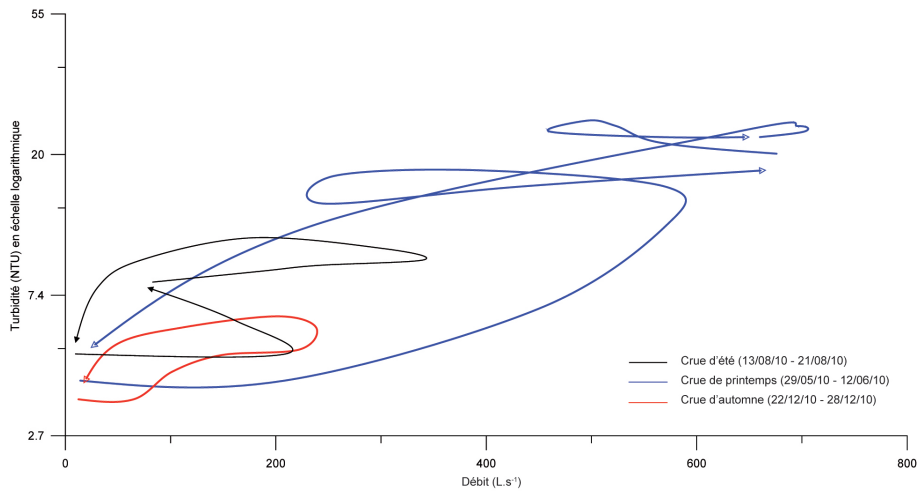


FIGURE 4.8 – Hystérésis de Fontaine Noire observées sur 3 périodes hydrologiques

1.1.4 Calcul du régime des rivières

Pour notre étude, la rivière du Chéran et l'aval de la source du Groin ont été retenus. Afin de connaître le régime d'écoulement de ces deux sources, nous avons calculé leurs coefficients de Pardé sur une durée de 5 ans (de 2005 à 2010). Les coefficients de Pardé Pk_i décrivent la distribution mensuelle relative des débits. Ils reflètent le comportement hydrologique saisonnier. Le coefficient de Pardé moyen du mois i représente le rapport du débit mensuel moyen du mois i au débit annuel moyen [OFEV 2007].

$$Pk_i = MMQ_i / MQ \quad (4.9)$$

Avec : MMQ_i le débit mensuel moyen du mois i et MQ le débit annuel moyen.

A partir de ce calcul, Pardé [1933] distinguait trois grands types de régimes :

- ◇ le régime simple : caractérisé par une seule alternance annuelle de hautes et de basses eaux (un maximum et un minimum mensuels au cours de l'année hydrologique) et, en général, par un seul mode d'alimentation ;
- ◇ le régime mixte : 2 maxima et 2 minima par an, correspondant à plusieurs modes d'alimentation ;
- ◇ le régime complexe : plusieurs extremas et modes d'alimentation.

Les résultats sont représentés sur la figure 4.9. Nous observons sur la figure que les deux rivières ont le même régime, elles présentent un fort coefficient de Pardé en Mars puis un second moins élevé en Décembre. Ces deux pics caractérisent un régime nivo-pluvial, la différence entre nivo pluvial méridional et jurassien paraît difficile à identifier.

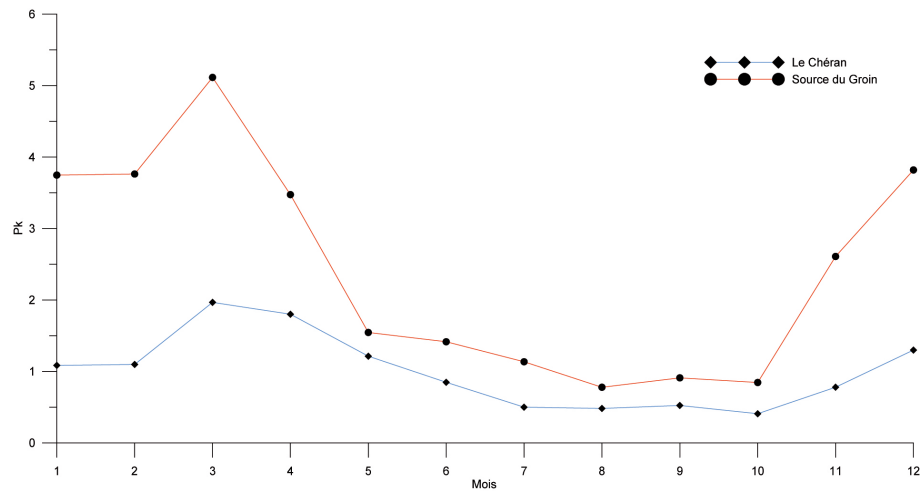


FIGURE 4.9 – Détermination du régime de la source du Groin et de la rivière du Chéran par les coefficients de Pardé

1.2 Apport de la physico-chimie

1.2.1 Eléments majeurs

Lors de l'écoulement, l'eau interagit avec les roches et les éléments externes naturels ou anthropiques, elle dissout des minéraux et de la matière organique. Elle acquiert donc un chimisme au cours du temps dépendant de la solubilité des minéraux en fonction des conditions de pression et de température, ainsi que du temps de séjour. L'analyse des éléments majeurs montrent que les concentrations en Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- correspondent à environ 97% de la conductivité totale. La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper (Figure 4.10) fait ressortir un faciès chimique caractéristique, le type bicarbonaté calcique pour les sources ayant fait l'objet d'analyse des majeurs.

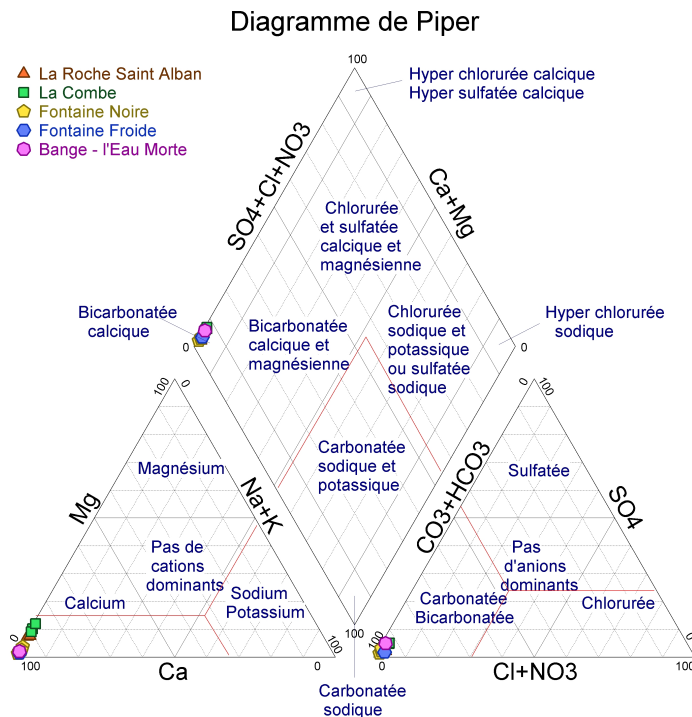


FIGURE 4.10 – Représentation des faciès chimiques des eaux dans un diagramme de Piper

1.2.2 Analyse de la conductivité

Bakalowicz, en 1979, propose l'étude de l'organisation des écoulements souterrains d'un système karstique en suivant la forme de la courbe de distribution de la minéralisation d'une source. Il propose les deux explications suivantes :

- si la forme est de type unimodal, le système possède une bonne homogénéisation chimique des eaux et sa structure est non fonctionnelle. La structure n'étant pas le seul paramètre de mélange, la présence d'une grande zone noyée jouant un rôle de tampon pourrait être une cause de cette homogénéisation.

- si la forme de la courbe est de type bi ou plurimodal alors le système est caractérisé par une structure fonctionnelle et par conséquent une homogénéisation moins importante.

Le courbe du système de La Roche Saint Alban (Figure 4.11) est de type unimodal impliquant l'existence d'une bonne homogénéisation des eaux souterraines due à une forte réserve dans la zone noyée.

Les courbes du système karstique de Fontaine Noire et de Bange - l'Eau Morte (Figure 4.11) présentent un aspect bimodal et très étalé provoqué par une homogénéisation des eaux moins importante due à un réseau de drainage très développé.

Le système de La Combe possède une courbe de distribution en fréquence de la conductivité intermédiaire aux deux autres systèmes (Figure 4.11). La courbe présente un type unimodal et est assez étalée. Ce site pourrait posséder une petite zone noyée permettant une homogénéisation des eaux tout en ayant un système de drainage bien développé.

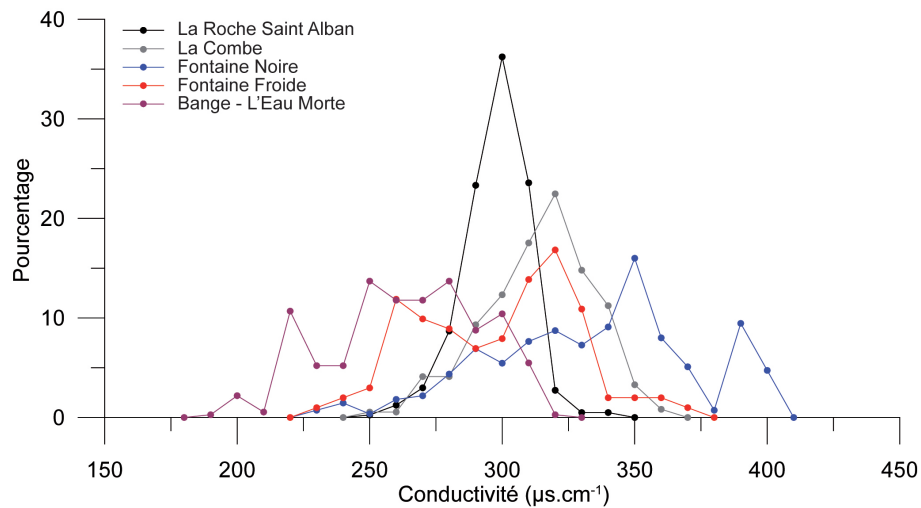


FIGURE 4.11 – Distribution des données journalières des conductivités triées par classe sur la période 2009 - 2010

1.2.3 Analyse de la turbidité

A partir des chroniques journalières de turbidité mesurée de 2010 à 2011, des analyses du pourcentage cumulé de la turbidité de trois sites d'études (La Roche Saint Alban, La Combe et Fontaine Noire) ont été réalisées (Figure 4.12). Elles montrent un respect des normes de potabilité (< 2 NTU) de l'eau du système karstique de La Roche Saint Alban pendant 350 jours. Pour les eaux du système de La Combe, la norme est respectée pendant 215 jours alors que pour les eaux de Fontaine Noire la norme n'est pas dépassée seulement durant 40 jours.

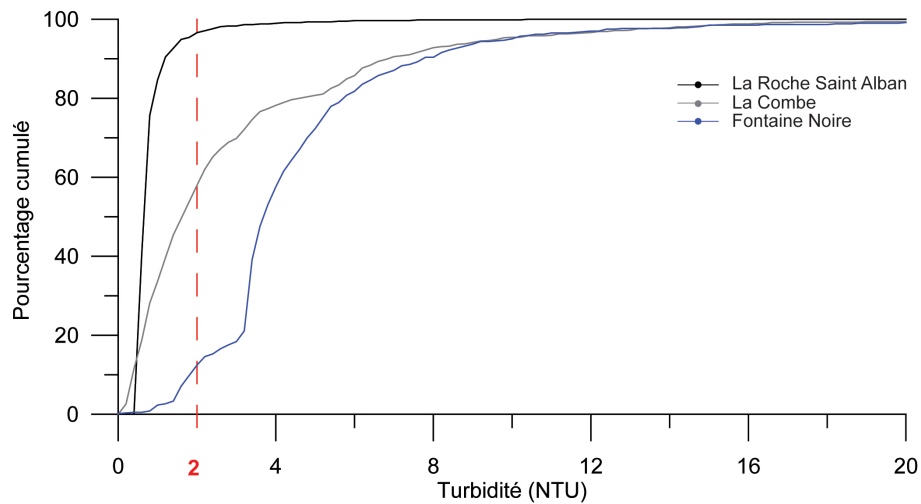


FIGURE 4.12 – Pourcentage cumulé de la turbidité des eaux de 3 sources karstiques au cours de l'année 2010

L'année 2010 est une année plutôt sèche par rapport aux 10 dernières années. L'application de cette analyse sur plusieurs cycles hydrologiques permettrait d'avoir des valeurs moyennées plus respectables. Les fortes teneurs en turbidité du système de Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey pourraient être expliquées par le fait que les mesures ont été réalisées pendant des périodes plus sèches que la normale. Il faudrait

continuer ces mesures sur plusieurs années pour vérifier si cette tendance se poursuit.

2 Caractérisation des sols des bassins versants

L'étude a consisté en des mesures du pH, du COT, de Nt, des teneurs en carbonate et en matière organique (pertes au feu) et de spectrométrie infrarouge.

L'analyse des spectres infrarouges permet de mettre en évidence cinq catégories réparties sur 11 bandes :

- les carbonates (comprises entre (1330–1540, 1700–1840, 2100–2300 et 2400–2600 cm^{-1});
- la matière organique caractérisée par les groupements $-\text{OH}$, CH_2 et $-\text{CH}_3$ ainsi que les C-O (avec 1550–1650 et 3330–3600 cm^{-1});
- les argiles (définies par les bandes comprises entre 750–800 et 3620–3700 cm^{-1});
- les silicates (de 1050 à 1150 et de 1200 à 1250 cm^{-1});
- un mélange de carbonate et de matière organique (allant de 2800 à 3000 cm^{-1}).

2.1 Description et analyses physico-chimiques des sols

2.1.1 La Roche Saint Alban

Une prospection sur le bassin d'alimentation de cette source karstique a mis en évidence trois grands types de sol (Figure 4.13). Les échantillons ont été principalement prélevés sur une zone de création de piste forestière. Celle-ci a permis de réaliser une coupe des 4 grands types de sol (BOU 1 à BOU 4) présents sur les calcaires du Tithonique. Ce faciès recouvre approximativement 75% du bassin d'alimentation de la source. Le reste du bassin versant correspond à des marnes du Valanginien. Le sol associé à ce dernier faciès est de type brun.

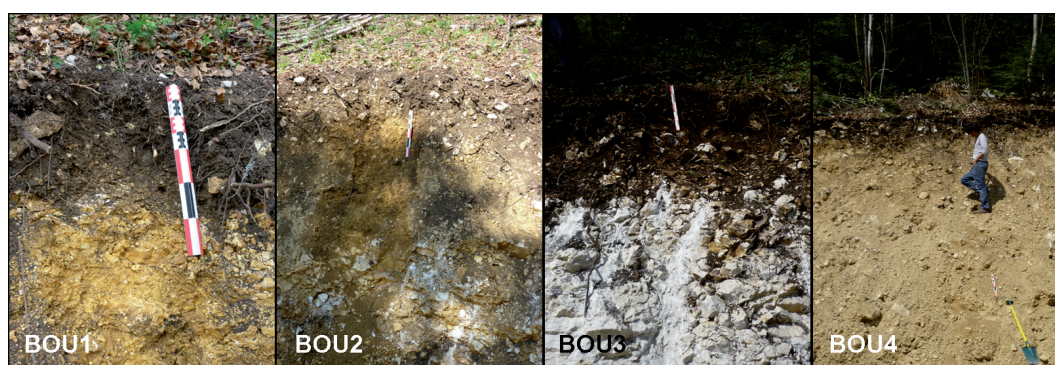


FIGURE 4.13 – Illustration des différents sols rencontrés sur le bassin d'alimentation de la Roche Saint Alban

Le sol brun

Sur le bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban, il est représenté par deux formations échantillonnées (BOU1 et BOU2) reposant sur une roche mère calcaire de type récifal (Kimméridgien). Le sol brun est, ici, divisé en trois horizons depuis

la surface.

Le premier horizon (BOU 1.1 et BOU 2.1) a une épaisseur de 20 cm environ. Il est de couleur brun noir et contient de nombreuses racines fines de taille moyenne, grossières et subhorizontales à la base. La structure de ce faciès est limono argileux. L'horizon contient un feutrage mycélien abondant par plaque. La présence d'insecte divers et abondant montre une bonne vie biologique et une bonne biomasse. Au sommet l'OL (litière) est composé de feuille de hêtre. Il ne présente pas de OH/OF.

La différence entre le pH KCl et le pH H₂O supérieure à 0.5, caractérise un sol moyennement acide. Les analyses physico-chimiques et infrarouges montrent que ce sol est riche en matière organique ($\simeq 30\%$) et en argile (Figure 4.14). Les mesures de COT (176 et 260 mg.L⁻¹) et de Nt (28.94 et 18.84 mg.L⁻¹) viennent confirmer cette tendance (Tableau 4.3). Le taux de carbonate est assez pauvre (2%).

Le deuxième horizon (BOU 1.2 et BOU 2.2) se développe sur une dizaine de centimètre. Il présente une transition diffuse vers le bas et nette vers le haut. L'horizon d'altération contient des roches grossières représentant environ 50% du volume. Le faciès y est jaunâtre et se débite en plaque. Les blocs retrouvés sont de taille centimétrique et entourés par une matrice brune fine de composition argilo-limoneuse à structure polyédrique et peu nette.

La différence entre le pH KCl et le pH H₂O est comprise entre 0.5 et 1, l'horizon conserve donc son acidité moyenne. Les analyses physico-chimiques et infrarouges montrent que ce sol a des teneurs deux fois plus basses en matière organique (15%) et en argile que l'horizon supérieur. Les mesures de COT (125.10 et 126.20 mg.L⁻¹) et de Nt (15.28 et 13.49 mg.L⁻¹) baissent elles aussi (Tableau 4.3). Le taux de carbonate augmente (passant de 2% à 10%).

Le troisième horizon (BOU 1.3 et BOU 2.3) est très altéré et présente une épaisseur totale de 40 à 50 cm. Il contient environ 20% d'éléments grossiers arrondis de taille centimétrique. Le tout dans une matrice jaunâtre argilo-sableuse incluant des petites poches plus argileuses de couleur brunâtre d'environ 5 cm de diamètre. Des racines subhorizontales de tailles moyennes sont présentes mais de façon peu abondantes.

La différence entre le pH KCl et le pH H₂O est inférieure à 0.5, l'horizon possède une faible acidité de réserve. Les analyses physico-chimiques et infrarouges montrent que l'horizon a des teneurs très basses en matière organique (3%) et en argile (diminution du pic sur le spectre infrarouge). Les mesures de COT (32.10 et 10.18 mg.L⁻¹) et de Nt (4.10 et 1.28 mg.L⁻¹) sont basses elles aussi (Tableau 4.3). Le taux de carbonate augmente encore (passant de 10% à 30%).

Le sol de type colluvial

Il est caractérisé sur le bassin d'alimentation par la formation BOU 3 reposant sur le Kimméridgien calcaire. Ce sol peut être divisé en deux horizons.

Le premier horizon (BOU 3.1) se développe sur une épaisseur de 30 cm. Il est de couleur noir et inclue des roches calcaires provenant de l'amont. La litière en surface est épaisse.

La différence entre le pH KCl et le pH H₂O est comprise entre 0.5 et 1, l'ho-

rizon possède une acidité moyenne. Les analyses physico-chimiques et infrarouges montrent que cet horizon a les teneurs en matière organique (32%) et en argile (Figure 23) les plus importantes. Les mesures de COT et de Nt sont très importantes (Tableau 4.3). Le taux de carbonate est très faible (2%).

Le deuxième horizon (BOU 3.2) est d'une épaisseur de 2.5 m. Il est très hétérogène et prend l'apparence d'une masse meuble de type colluvial sans matrice de constitution. La couleur tend vers le brun clair. Les éléments sont grossiers et toujours représentés par des calcaires à faciès blanc.

L'horizon possède une acidité moyenne avec une différence entre le pH KCl et le pH H₂O comprise entre 0.5 et 1. Les analyses physico-chimiques et infrarouges montrent que cet horizon possède des teneurs plus faibles en matière organique (10%) et en argile. Les mesures de COT et de Nt sont plus faibles, elles aussi (Tableau 4.3). Le taux de carbonate augmente (passant de 2% à 20%).

L'organosol

Il est représenté par la formation BOU4. Il correspond en un unique horizon noir, d'une cinquantaine de centimètre, directement posé sur la roche mère calcaire. Il est moyennement acide (différence des pH supérieur à 0.6 (Tableau 4.3)), riche en matière organique (44.5%). Il comporte cependant une teneur moindre en COT (73 mg.L⁻¹) et Nt (19 mg.L⁻¹) que les autres sols.

Tableau 4.3 – Données physico-chimiques des différents sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban

BOU	pH H ₂ O	pH KCl	Diff.	% (MO)	% (Carbonate)	COT (mg.L ⁻¹)	Nt (mg.L ⁻¹)
1.1	7.49	6.81	0.68	27.83	4.31	176.10	28.94
1.2	8.08	7.3	0.78	15.30	10.71	125.10	15.28
1.3	8.78	8.32	0.46	2.54	32.90	32.10	4.10
2.1	6.68	5.86	0.82	34.79	1.42	260.40	18.84
2.2	8.08	7.27	0.81	16.33	8.77	126.20	13.49
2.3	8.86	8.45	0.41	3.92	34.84	10.18	1.28
3.1	6.64	5.87	0.77	44.46	6.52	73.02	18.94
3.2	7.12	6.38	0.74	32.41	2.38	268.80	20.17
3.3	8.28	7.59	0.69	10.06	19.25	36.74	11.24
4	8.86	8.42	0.44	3.12	34.93	10.85	2.66

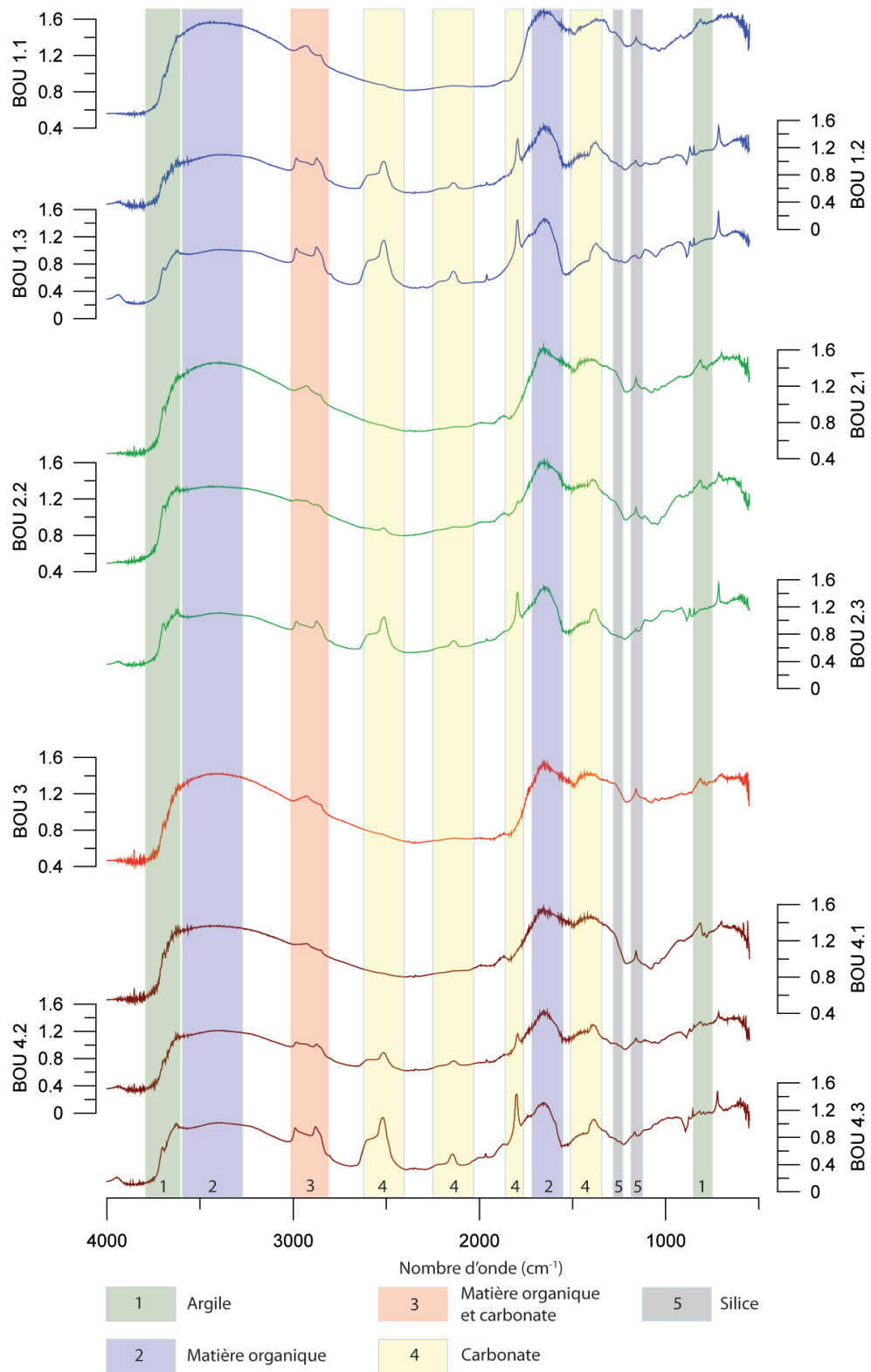


FIGURE 4.14 – Analyses infrarouges des sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban

La matière organique fluorescence dans les sols

Pour chaque échantillon de sol, nous avons identifié et quantifié la matière organique fluorescente (en équivalent de sulfate de quinine (Tableau 4.4)) ainsi que la valeur de l'UV à 254 nm. Nous observons trois types de matière organique : le type protéique avec le type tyrosine et le type tryptophane, le type lié à la production microbiologique et le type humique. Pour les prélèvements BOU 1, 2 et 4 la quantité du type humique diminue globalement avec la profondeur, alors que le type humique et celui lié à la production microbiologique augmente. L'UV à 254 nm marqueur des groupements aromatiques montrent la même tendance que le type humique. Enfin, le prélèvement BOU 3 a la particularité de ne pas posséder le type lié à la production microbiologique.

Tableau 4.4 – Identification des matières organiques fluorescentes en fonction des différents sols du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban

BOU	Tyrosine	Tryptophane	Prod. microbio.	Humique	UV
1.1	$3.88E^{-08}$	$6.55E^{-08}$	$1.91E^{-18}$	$2.92E^{-06}$	3.48
1.2	$2.24E^{-08}$	$7.82E^{-08}$	$1.39E^{-12}$	$2.86E^{-06}$	2.36
1.3	$1.6E^{-07}$	$2.98E^{-07}$	$1.75E^{-06}$	$2.54E^{-06}$	0.64
2.1	$1.17E^{-08}$	$2.79E^{-08}$	$3.86E^{-11}$	$2.11E^{-06}$	4.2
2.2	$5.05E^{-08}$	$8.63E^{-08}$	$5.92E^{-13}$	$2.90E^{-06}$	2.16
2.3	$4.50E^{-07}$	$5.17E^{-07}$	$7.78E^{-07}$	$5.77E^{-07}$	0.27
3	$2.78E^{-07}$	$5.4E^{-07}$	0	$2.18E^{-06}$	2.18
4.1	$5.08E^{-09}$	$1.70E^{-08}$	$2.49E^{-13}$	$1.70E^{-06}$	4.95
4.2	$5.83E^{-07}$	$6.77E^{-07}$	$4.54E^{-18}$	$1.95E^{-06}$	0.47
4.3	$4.92E^{-07}$	$6.43E^{-07}$	$4.55E^{-07}$	$8.33E^{-07}$	0.269

2.1.2 La Combe

Sur le bassin d'alimentation, les types de sol (Figure 4.15) sont en relation étroite avec les faciès géologiques sur lesquels ils reposent. Ainsi, trois catégories de sol de SC 1 à SC 3 ont été référencées et analysées reposant respectivement sur les calcaires urgoniens, les marnes valangiennes et les calcaires valanginiens.

La rendzine

La formation est caractérisée sur le bassin d'alimentation par la formation SC 1 reposant sur un faciès urgonien. Il se présente en place et en éboulis avec une importante charge grossière d'environ 5 cm en surface. La rendzine se développe sur une épaisseur totale de 20 à 30 cm. Elle est caractérisée par la présence de hêtres, de sapins et d'une faible couverture herbacée. Il se décompose en deux niveaux.

Le premier horizon (SC 1.1) est constitué de terre fine de couleur noire limono-argileuse. Il présente 50% d'éléments grossiers. L'effervescence à l'acide peut être présente mais localisée.

L'horizon a une faible acidité de réserve, la différence entre le pH KCl et le pH H₂O est inférieure à 0.5. Le pourcentage en matière organique est élevée (40.45%)

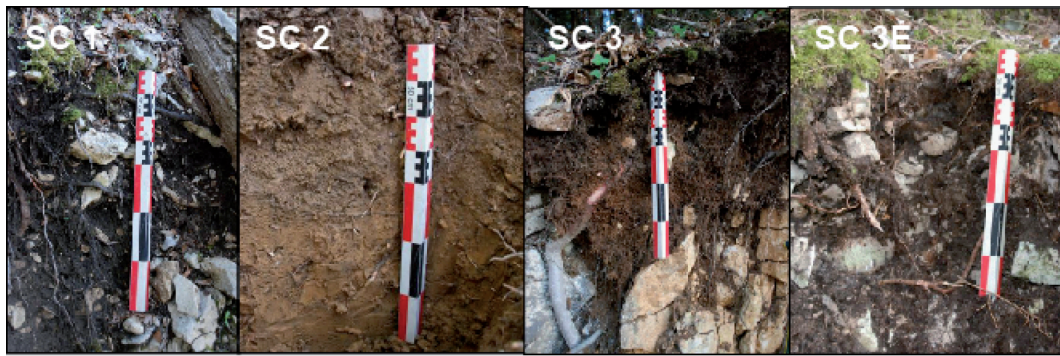


FIGURE 4.15 – Illustration des différents sols rencontrés sur le bassin d'alimentation de La Combe

(Tableau 4.5). La teneur carbonate est faible (6.5%). La présence d'argile paraît plutôt faible sur les spectres infrarouges (Figure 4.16).

Le deuxième horizon (SC 1.2) correspond à une terre fine brune limono-argileuse sur 2 à 20 cm (horizon irrégulier). Il possède une charge grossière de bloc urgonien (plus ou moins décarbonaté). L'effervescence par attaque acide y est ici que très modérée.

L'acidité de réserve reste faible. Le pourcentage en matière organique se trouve divisé par deux (de 40% à 22%) et le taux de carbonate lui reste stable. La teneur en argile, visible par le spectre infrarouge, est plus importante.

Le sol brun

le sol repose sur des marnes valanginiennes, et est noté SC 2. Il se présente sur une pente faible et est composé d'une hêtraie quasiment pure. La litière est de type Moder surmontée de feuilles. L'horizon OL est très marqué et représente une épaisseur de 2 cm. L'horizon OF est de 2 cm et le OH n'existe pas. L'épaisseur de ce sol est de 60 à 80 cm et se décompose en 4 horizons.

Le premier horizon (SC 2.1) est mélangé avec l'OF. Il est brun foncé, limono-argileux et grumeleux. Il présente une activité biologique forte dans le A et le AB. L'épaisseur est de 5 cm.

L'acidité de réserve est moyenne, la différence des pH est comprise entre 0.5 et 1. L'horizon contient un faible pourcentage de matière organique (13.43%) et un pourcentage quasi nul de carbonate (0.90%). Le spectre infrarouge montre une valeur assez élevée d'argile (Figure 4.16).

Le deuxième horizon (SC 2.2) est brun foncé et limono-argileux. La structure est polyédrique sub-anguleux peu nette. L'épaisseur du niveau est de 15 cm. Il est caractérisé par une forte abondance de mycéliums et de racines.

Le troisième horizon (SC 2.3), de 20 cm, est de couleur brune. Il est argilo-limoneux et frais. La structure est polyédrique sub-anguleux. Les racines de tailles moyennes à fines y sont abondantes.

Le dernier horizon (SC 2.4) est caractérisé par une terre argileuse. Il présente des petites tâches de charbon. L'argile ne montre pas d'hydromorphie nette. L'épaisseur est de 20 cm et plus. Les racines de tailles moyennes à fines y sont abondantes.

Les caractéristiques physico-chimiques de ces trois derniers horizons peuvent être présentées ensemble. L'acidité de réserve est très élevée, pour les trois niveaux la différence des pH est supérieure à 1. Le pourcentage de matière organique reste faible (inférieure ou égale à 10%) et celui des carbonates reste quasi nul. La teneur en argile, visible sur les spectres infrarouges augmentent avec la profondeur.

L'organosol

Il repose sur du Valanginien calcaire très fracturé et est représenté par la formation SC 3. Les travaux de sylviculture ont été réalisés sur ce type de formation. Sur cette zone, l'organosol se développe sur 50 cm soit sur une roche mère en place (SC 3) soit sur un éboulis (SC 3E ou SC 3M).

L'organosol sur roche mère en place peut être divisé en deux horizons.

Le premier horizon (SC 3.1) se développe de 0 à 5 cm. Il est de couleur noir à brun foncé. La litière est de type Moder. La végétation se compose d'érables, de chênes, de sapins, de charmes et de très peu de hêtres. Le sol, grumeleux et très sec, montre une activité biologique intense et une abondance de racines. Le contact avec l'horizon inférieur est net à très net.

L'horizon présente une acidité de réserve moyenne avec une différence des pH comprise entre 0.5 et 1. Comme pour le sol brun, le pourcentage de matière organique est faible (18%) et le pourcentage de carbonate quasi inexistant (0.4%). Cet horizon montre une teneur en argile et en silice élevé (Figure 4.16).

Le second niveau (SC 3.2) se développe de 5 à au-delà de 45 cm. Il est brun limoneux, sec et continu. La structure est polyédrique nette à assez nette. Il est parsemé d'éléments carbonatés grossiers de taille décimétrique dont certains sont très altérés. Les racines sont abondantes. Il n'y a pas d'effervescence lors de la présence d'acide.

L'horizon présente toujours une acidité de réserve moyenne. Le pourcentage de matière organique diminue (de 18% à 10%) et celui des carbonates reste en dessous des 1%. Les spectres infrarouges montrent une baisse des teneurs en argile, et pour la silice, cette baisse est très significative (Figure 4.16).

Sur éboulis, le sol a été séparé en deux catégories : riche (SC 3M) ou pauvre en mycélium (SC 3E).

Le SC 3E représente le même type de sol que le SC 3 mais sur une zone à éboulis. Les blocs représentent 80% du volume et se trouvent dans une matrice noire. Ce sol présente des pourcentages assez faibles en matière organique (22.67%) et en carbonate (6.15%). Le spectre infrarouge (Figure 4.16) montre des pics significatifs en argile et en silice.

Le SC 3M a la particularité d'être très riche en mycélium. Il présente donc un

pourcentage en matière organique très important (65%). La teneur en carbonate reste faible (2.2%). Le spectre infrarouge montre une teneur un peu plus basse d'argile par rapport au niveau SC 3E. La présence de silice est très importante (Figure 4.16).

Tableau 4.5 – Données physico-chimiques des différents sols du bassin d'alimentation de La Combe

SC	pH H ₂ O	pH KCl	Diff.	% (MO)	% (Carbonate)	COT	N
1.1	7.3	7.06	0.24	40.45	6.50	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
1.2	7.82	7.37	0.45	22.32	6.40	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
2.1	5.07	4.19	0.88	13.43	0.90	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
2.2	4.44	3.26	1.18	7.42	0.48	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
2.3	5.16	3.77	1.39	5.74	0.76	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
2.4	5.73	3.91	1.82	10.50	1.05	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
3.1	6.3	5.56	0.74	17.94	0.41	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
3.2	6.58	5.66	0.92	10.19	0.92	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
3M	5.69	5.19	0.5	64.40	2.22	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>
3E	6.9	6.53	0.37	22.67	6.15	<i>N.C.</i>	<i>N.C.</i>

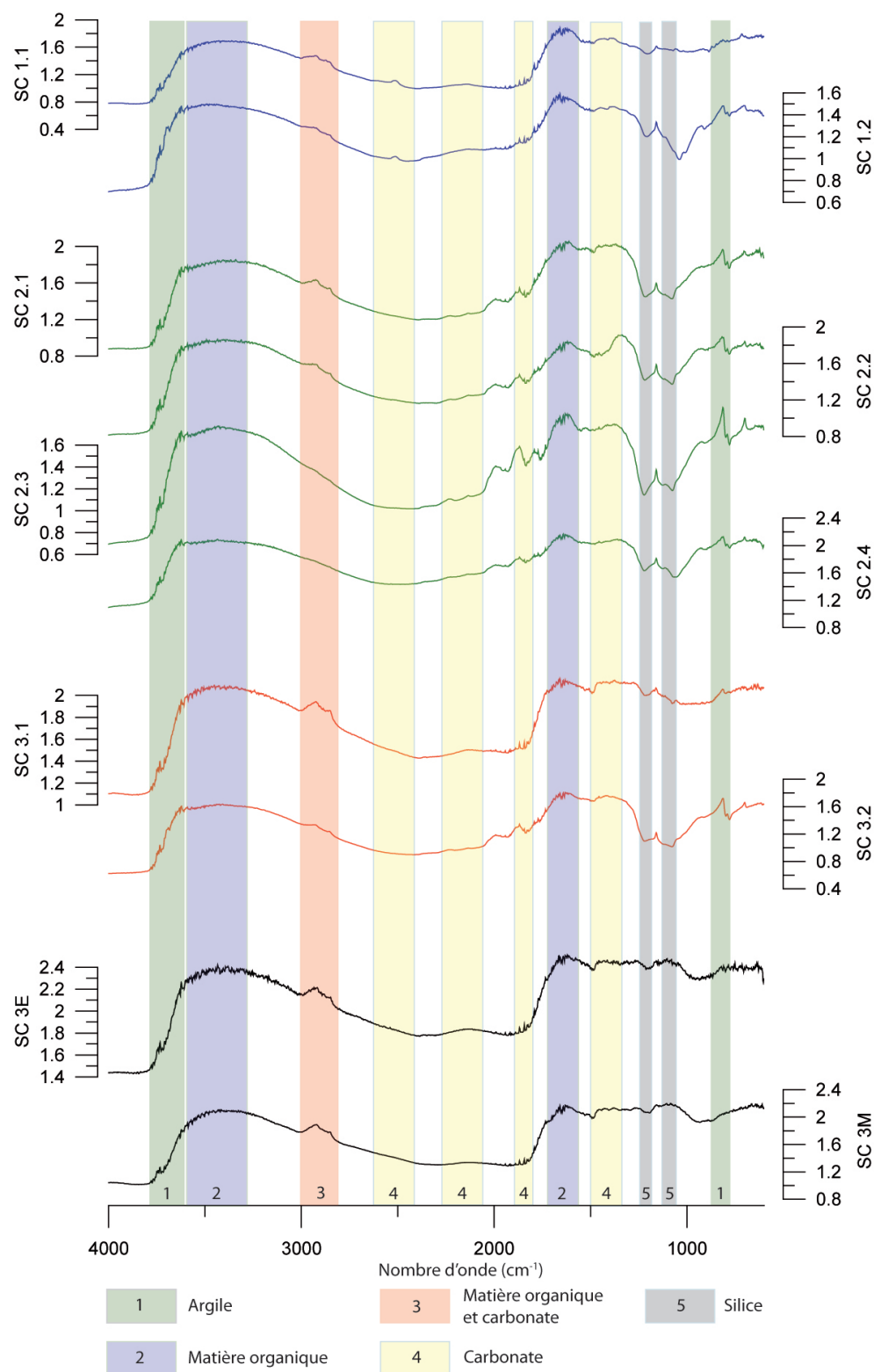


FIGURE 4.16 – Analyses infrarouges des sols du bassin d'alimentation de La Combe

2.2 Extrapolation aux autres sites d'études

Dans les massifs subalpins, les sols ont tendance à se développer selon le faciès sur lequel il repose, bien évidemment la végétation présente joue un rôle important.

Dans ce cas présent nous pouvons donc nous permettre d'extrapoler les types de sols en fonctions des faciès identifiés.

2.2.1 Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey

Le bassin d'alimentation de Fontaine Noire appartient au Mont Peney, sur cette zone nous retrouvons un faciès principal qui correspond à l'Urgonien (Figure 4.17A). Ce faciès calcaire massif ne permet pas un développement très important de la végétation, le sol caractéristique, le même que celui retrouvé à Saint Cassin, est de type rendzine ou organosol. Il est donc très peu épais. Toutefois, l'Urgonien est surmonté de deux autres types de formation, les argiles rouges (Figure 4.17B) et les grès à pecten et nummulite. Sur les argiles, d'une épaisseur pouvant atteindre les dizaines de mètres, la végétation peut se développer aisément dessus. Le type de sol présent est de type brun. La seconde formation assez meuble peut permettre la mise en place de podzol plus ou moins profond (en moyenne 50 cm).



FIGURE 4.17 – Deux types de faciès du bassin d'alimentation de Fontaine Noire : (A) le calcaire Urgonien et (B) les argiles rouges

2.2.2 Les Echelles

Le bassin d'alimentation possède essentiellement des faciès calcaires de l'Urgonien. Le Barrémien inférieur et supérieur est composé de calcaires plus ou moins friables. Sur ces faciès se développent préférentiellement des sols de faible épaisseur du type organosol ou rendzine. Dans cette zone, le sommet de l'Urgonien est composé de calcaire intercalé de marne, on pourra alors y retrouver des sols bruns. Enfin, localement se trouve un faciès calcaire daté du Crétacé supérieur, les sols présents sont donc des rendzines ou des organosols.

2.2.3 Bange - l'Eau Morte

Le bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte est essentiellement composé de calcaire massif de l'Urgonien. Sur les calcaires massifs se développent principalement des sols de faible épaisseur telles que les rendzines ou les organosols. Toutefois, nous retrouvons aussi un faciès marneux, les marnes hauteriviennes, qui permettent un développement de la végétation et la formation de sol brun épais.

3 Conclusion

Par l'intermédiaire des suivis en continu des débits, des pluies et de la conductivité, nous avons pu caractériser le fonctionnement des systèmes karstiques de moyennes montagnes. Globalement, tous les systèmes ont un temps de réponse très rapide après des précipitations, entre 1 et 2 jours. Toutefois, les réserves en eau diffèrent en fonction des systèmes. La source karstique de La Roche Saint Alban apparaît comme le système le plus inertiel avec une vidange des réserves qui s'effectue sur 60 jours. Les systèmes de La Combe et de Bange - l'Eau Morte présentent des réserves moins importantes, la vidange dure entre 10 et 15 jours. Enfin, les sites de Fontaine Noire et de la source du Groin sont des systèmes peu inertiels, les vidanges sont très rapides, 5 jours environs.

La karstification des systèmes varie d'un site à l'autre. Ainsi, en étudiant les courbes de récession, nous avons pu constater que le système de Fontaine Froide semble être plus karstifié à l'amont qu'à l'aval et présente des retards à l'infiltration. La Roche Saint Alban possède une importante zone noyée et les autres sites sont des systèmes possédant des réseaux de drainage très développés avec une zone noyée assez restreinte. Ces résultats ont été confirmés par l'étude de la distribution des données journalières de la conductivité réalisée sur la période 2009 - 2010. Ces différences de structure interne influent sur la qualité de l'eau. Par exemple, la turbidité des eaux de La Roche Saint Alban ne dépassent que très rarement les normes de potabilité, contrairement aux eaux de Fontaine Noire où la turbidité est régulièrement très élevée.

L'étude des courbes d'hystérésis de la turbidité en fonction du débit fait apparaître que l'origine des matières en suspension est différente au cours du cycle hydrologique. En exemple, durant la période des hautes eaux à La Roche Saint Alban, les matières en suspensions sont issues de la surface, alors que pendant les basses eaux, les venues ont comme origine l'endokarst puis de l'exokarst. Toutefois, des sites comme celui de Fontaine Noire peuvent présenter des venues essentiellement exokarstiques.

Le sol des bassins d'alimentation de moyennes montagnes n'est que peu diversifié sur les sites d'étude. Nous observons principalement deux types de sol : le brun, très riche en argile et très épais, et l'organosol, très riche en matière organique et de faible épaisseur. Les analyses infrarouges réalisées sur les sols montrent que globalement la matière organique se dégrade avec la profondeur et est donc moins présente alors que la matière minérale augmente. Une extrapolation des types de sol à d'autres sites a pu être faite car les systèmes karstiques des pré-alpes présentent généralement les mêmes faciès géologiques et le même type de végétation.

L'ensemble des caractéristiques de ces sites permettent de mieux comprendre les sensibilités des systèmes karstiques de moyennes montagnes. Bien qu'ils soient différents dans le fonctionnement et le développement, les systèmes sont assez semblables. Ils ont des réponses rapides, des types de sol similaires, une petite taille relativement proche. Dans l'optique d'approfondir leurs sensibilités, nous proposons

dans les prochains chapitres d'étudier la vulnérabilité intrinsèque de chaque système par la méthode PaPRIKa. Nous nous proposons d'observer le comportement des systèmes face à des activités anthropiques (sylviculture) et au changement climatique observable depuis 1950.

Deuxième partie

Vulnérabilités des petits systèmes karstiques montagnards

Chapitre 5

Test de la méthode PaPRIKa pour l'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des petits karsts de montagne

Pour évaluer la vulnérabilité intrinsèque des petits systèmes karstiques de montagne, nous avons choisi 5 sites d'études, à savoir, La Roche Saint Alban, Fontaine Noire, La Combe, Fontaine Froide et Bange-l'Eau Morte. Ces systèmes ont un développement karstique différent, sont composés de faciès géologiques différents et ont des tailles différentes. Nous avons décidé d'utiliser et d'évaluer la méthode PaPRIKA afin de déterminer s'il elle était adaptée à ce type de petit bassin versant karstique de montagne. En effet, cette méthode a été mise au point à partir de grands systèmes karstiques de plateau. Avant de tester la méthode, nous exposons son principe tel que énoncé dans le guide méthodologique de Döerfliger et Plagnes [2009].

1 Principe de la méthode PaPRIKa

La méthode PaPRIKa est une méthode multicritères de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque d'un aquifère karstique. Les cibles de cette méthode sont d'une part la ressource et d'autre part le captage. L'essentiel des critères permet de caractériser le transfert depuis la surface vers la zone saturée. Le transfert au sein de la zone saturée est pris en considération dans un deuxième temps, avec la notion de vitesse de transfert basée sur les résultats d'essais de traçage artificiel. La méthode PaPRIKa est une méthode spécifiquement développée pour les aquifères karstiques. Ainsi, la méthode ne s'applique pas sans discernement pour tous les aquifères carbonatés. Si l'aquifère carbonaté n'est pas caractérisé par un fonctionnement karstique, il est considéré comme un aquifère fissuré, pour lequel la méthode PaPRIKa ne s'applique pas. La méthode est appliquée à l'ensemble du bassin d'alimentation, ainsi qu'aux bassins versants des pertes associées, même si ceux-ci ne reposent pas nécessairement sur des formations carbonatées karstiques. Tous les critères ne feront pas l'objet d'une cartographie dans ce cas spécifique. La méthode PaPRIKa est une méthode de cartographie à index à pondération des critères. Le choix des critères est en adéquation avec la spécificité en termes de structure et de fonctionnement

des aquifères karstiques. Les critères sont au nombre de 4, à savoir (i) le **critère P** pour couverture protectrice résultant de la combinaison la plus protectrice entre les **critères S** Sol, la lithologie, l'épaisseur et la fracturation de la zone non saturée et le **critère E** pour fonctionnement épikarstique, (ii) le **critère R** pour la nature de la roche du réservoir souterrain, (iii) le **critère I** pour la nature de l'infiltration (diffuse ou ponctuelle au niveau de phénomènes exokarstiques) et (iv) le **critère Ka** pour le degré de karstification et le fonctionnement du système karstique.

1.1 Définition des critères

Critère P

Le critère P est un critère de protection vis-à-vis de l'infiltration ; il caractérise l'aptitude à stocker de manière temporaire l'eau à proximité de la surface, celle-ci générant un effet de retard sur l'infiltration. Il dépend d'une part du critère "Sol ou Couverture pédologique" (S), d'autre part du critère "aquifère épikarstique" (E) et finalement de la nature, de l'épaisseur et de la fracturation de la zone non saturée "ZNS". Dans le cas où l'ensemble des critères peut être caractérisé, le critère le plus protecteur vis-à-vis d'un transfert de contaminant vers la ressource ou vers la source est retenu. Le critère P caractérise l'état de la surface vis-à-vis du refus à l'infiltration dans les bassins versants des pertes. Quatre états de surface sont définis dans le tableau 5.1, avec P1 le moins vulnérable et P4 le plus vulnérable.

Tableau 5.1 – Description de l'état de surface dans les bassins versants des pertes [Dörfliger et Plagnes 2009]

ETAT DE SURFACE dans les bassins versants des pertes	
P1	terrains caractérisés par de fortes perméabilités : graviers et conglomérats non cimentés
P2	terrains caractérisés par des perméabilités moyennes : arènes granitiques (faciès d'altération - érosion de massif granitique), sables, calcaires
P3	terrains caractérisés par des perméabilités faibles : grès peu fissurés, conglomérats cimentés, roches magmatiques et métamorphiques saines (granites, gneiss, basaltes)
P4	terrains caractérisés par des perméabilités très faibles : argiles, marnes zones de cours d'eau pérenne ou temporaire

1 ♦ Critère S (couverture pédologique et géologique)

Sous le terme de sol sont regroupées les formations pédologiques et géologiques ayant un pouvoir protecteur important vis à vis de l'aquifère (argiles, argiles marneuses, conglomérats, etc.). Lorsqu'un sol est présent, la méthodologie est basée sur l'épaisseur, la texture et la pierrosité.

La texture et la pierrosité sont retenues en trois classes [Suais *et al.* 1990, Dörfliger 1996, Desprats *et al.* 1998]. La texture se décompose par des classes présentant une dominante d'argiles, une dominante de limons ou une dominante de sables (Tableau 5.2). De la même façon la pierrosité est identifiée selon les classes caractérisant 0-30 % de cailloux, 15-60 % de cailloux ou > 60 % de cailloux (Tableau 5.2). Ces deux

paramètres sont croisés pour déterminer la nature (notée de 1 à 4) du sol qui est ensuite croisée avec l'épaisseur des sols (Tableau 5.3).

Tableau 5.2 – Tableau de détermination de la nature d'un sol en fonction de sa texture et sa proportion de cailloux [Dörfliger et Plagnes 2009]

		Texture		
		<i>Argile</i> $A > 12\%$	<i>Limons</i> $A < 12\% \text{ et } S < 60\%$	<i>Sable</i> $S \geq 60\%$
% Cailloux	0 – 15%	1	1	2
	30 – 60%	1	2	3
	> 60%	2	3	4

Tableau 5.3 – Tableau de détermination des classes du critère S par croisement de la nature du sol et de son épaisseur [Dörfliger et Plagnes 2009]

S		Nature du sol				
		<i>inconnue</i>	1	2	3	4
Zones imperméabilisées		S0				
% Epaisseur	> 5m	S1	S1	S1	S2	S3
	1 – 5m	S1	S1	S2	S3	S3
	60 – 100cm	S2	S2	S3	S4	S4
	30 – 60cm	S3	S3	S4	S4	S4
	0 – 30cm	S4	S4	S4	S4	S4

En l'absence de données pédologiques relatives à la nature des sols, l'approche peut être simplifiée en ne considérant que l'épaisseur et la pierrosité du sol. Dans ce cas de figure, l'indice S se définit à partir de l'épaisseur S_e (appelée S1 à S4 dans la colonne "inconnue" du tableau 5.3) et en fonction de la pierrosité peut être modifié en S_{ep} (sans dépasser l'indice de très forte vulnérabilité 4) selon le tableau 5.4 :

Tableau 5.4 – Tableau de détermination des classes du critère S à partir uniquement des classes d'épaisseur et de la pierrosité [Dörfliger et Plagnes 2009]

Pierrosité	%	S_{ep}
peu caillouteux	0 – 30%	S_e
caillouteux	40 – 60%	$S_e + 1$
très caillouteux	> 60%	$S_e + 2$

Les surfaces imperméabilisées (comme les zones urbanisées) peuvent être caractérisées comme très protectrices et classées en S0, en fonction de l'occupation du sol du bassin d'alimentation, mais sans oublier d'évaluer les zones adjacentes pouvant être des zones réceptrices d'eau de ruissellement. A minima, il est particulièrement nécessaire d'identifier et de localiser les zones d'hétérogénéités des sols présentant un faible pouvoir retardant, c'est-à-dire présentant au moins l'un des critères suivant : épaisseur inférieure à 30 cm, au moins 60% de sables, plus de 60% d'éléments grossiers.

2 ◇ Critère E – Aquifère épikarstique

L'épikarst correspond à la couche superficielle des carbonates, c'est une zone très fissurée du fait de la décompression et de l'altération des terrains au voisinage de la surface. L'altération de ces horizons superficiels leur confère une perméabilité plus importante qui permet le stockage de l'eau et favorise l'infiltration lente et diffuse. La présence d'un épikarst diminue la vulnérabilité du karst au lieu de l'augmenter, comme décrit dans la méthodologie de Petelet *et al.* [2000] dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Description du critère E – "aquifère épikarstique"

E0	existence d'un épikarst épais ($> 1\text{m}$) continu latéralement et très bien développé, présentant des figures de dissolution horizontales et verticales témoignant de dissolution en milieu noyé ;
E1	aquifère perché (50 cm à 1 m) avec présence de puits et d'un niveau piézométrique, voir d'un lac temporaire ;
E2	aquifère épikarstique (20 à 50 cm) continu latéralement avec des sources temporaires d'un débit de l'ordre du litre/seconde et existence de puits collectant les eaux ; effet de stockage vérifié ;
E3	existence d'un aquifère ($< 20\text{ cm}$) avec présence de sources de débits peu importants et d'une continuité latérale plus ou moins bien représentée ; l'effet retard est limité ;
E4	pas d'aquifère épikarstique

3 ◇ Critère ZNS (caractéristiques de la zone non saturée)

La zone non saturée de l'aquifère assure le transfert de l'eau infiltrée vers la zone saturée, lieu des écoulements souterrains. La lithologie, l'épaisseur ainsi que le degré de fracturation/fissuration vont influencer la vitesse de transfert (Tableau 5.6). La vulnérabilité est d'autant plus importante que la roche est calcaire, l'épaisseur est faible et la fissuration est importante.

Tableau 5.6 – Tableau décrivant la lithologie de la zone non saturée

Lithologie de la ZNS	
L_{ZNS0}	Couches d'argiles de forte épaisseur
L_{ZNS1}	Marno-calcaires, craie
L_{ZNS2}	Calcaires en petits bancs et/ou avec des intercalations d'argile
L_{ZNS3}	Calcaires en gros bancs massif

Lorsque la zone non saturée est caractérisée par un ensemble hétérogène de lithologies différentes, on retiendra l'indice de la lithologie qui assure la plus grande protection.

L'épaisseur de la zone non saturée est estimée à partir de données issues de cartes piézométriques si celles-ci existent, par soustraction du niveau topographique de la cote piézométrique. Dans le cas où aucune carte piézométrique n'existe, l'épaisseur de la zone non saturée est estimée par défaut en appliquant un gradient à partir de l'exutoire, en considérant également le niveau piézométrique comme celui correspondant à celui de l'exutoire du système et en considérant l'altitude de sources de débordement. Un gradient peut être appliqué de manière graduelle. Trois classes

d'épaisseur de la zone non saturée sont proposées : (i) < 15 mètres, (ii) 15 à 50 mètres et (iii) 50 mètres et supérieur.

Le degré de fracturation est caractérisé aussi bien à l'échelle locale que globale, en considérant les affleurements et les zones de faille. Le critère ZNS est ainsi représenté sous forme de 5 classes, résultant de la combinaison des paramètres exposés tableau 5.7 (lithologie, épaisseur et fracturation).

Tableau 5.7 – Tableau de l'attribution de la valeur de l'indice ZNS en croisant les trois paramètres : épaisseur, lithologie et fracturation

Zone non saturée (ZNS)		Epaisseur		
		> 15m	15 – 50m	> 50m
Fracturation	Faible-moyenne	$L_{ZNS} + 1$	L_{ZNS}	L_{ZNS}
	Importante	$L_{ZNS} + 1$	$L_{ZNS} + 1$	L_{ZNS}
	Forte au niveau de faille	4	4	4

Critère R (Roche)

Pour le cas des karsts « classiques » pour lesquels la roche carbonatée affleure sur la majeure partie du bassin alimenté, ce critère est défini à partir de la nature des formations géologiques affleurantes et de la fracturation qui les affecte. En effet, la nature des formations influence les modalités de l'infiltration. Nous insistons sur le fait que c'est la lithologie et non la stratigraphie qui doit être retenue pour ce critère. De plus, la notion d'influence sur la vulnérabilité ne doit pas intervenir dans la définition des indices de ce critère, il s'agit d'un critère intrinsèque au système.

Les formations géologiques sont classées en fonction de leur proportion en argile, de l'épaisseur des bancs, et de la fracturation :

R0 : cette classe regroupe les formations marneuses (35-65 % de minéraux argileux) qui, si elles sont aquifères, ne permettent que des circulations très lentes.

R1 : cette classe regroupe les formations marno-calcaires (25-35 % de minéraux argileux), ne permettant que des circulations lentes.

R2 : cette classe regroupe les formations de calcaires marneux (10-25 % de minéraux argileux).

R3 : formations calcaires et dolomitiques, soit massives en gros bancs non fracturé, soit en petits bancs avec des intercalations argilo-marneuses et affectés par une fracturation homogène. Ces formations permettent des circulations faciles à rapides.

R4 : calcaires en gros bancs massifs affectés d'une fracturation en grand.

Critère I (modalités d'infiltration)

Pour déterminer la vulnérabilité des aquifères karstiques, ce n'est pas la quantité d'eau infiltrée qui importe mais la façon dont elle s'infiltré. Le critère I doit permettre de distinguer l'infiltration diffuse de l'infiltration concentrée. Le paramètre principal retenu pour définir ce critère est la pente des terrains, favorisant plus ou moins le ruissellement au détriment de l'infiltration. Le second paramètre est la morphologie

de la zone d'étude, en particulier la cartographie des points d'infiltration concentrés (pertes, bétoires, dolines) et de leur bassin de drainage. En effet, ces points ponctuels permettent une infiltration concentrée et très rapide jusqu'à la zone noyée de l'aquifère.

Le critère I est résumé ci-dessous :

I0 : zones du bassin où les pentes sont fortes ($>50\%$), induisant un ruissellement de l'eau très important et une infiltration négligeable voire même nulle et/ou terrains non calcaires ne permettant pas l'infiltration.

I1 : zones où les pentes sont fortes ($15-50\%$) favorisant grandement le ruissellement, l'infiltration étant très faible et/ou absence de morphologie karstique sur terrains calcaires.

I2 : zones où la pente est moyenne ($5-15\%$) permettant une infiltration lente.

I3 : zones à faibles pentes ($0-5\%$) où le ruissellement est limité et l'infiltration est favorisée et/ou zones avec dolines, dépressions, ouvalas (alignements de dolines).

I4 : cette classe est réservée aux manifestations de l'infiltration directe et concentrée qui se produit au niveau des pertes ainsi qu'au niveau des avens. Aux pertes elles-mêmes, sont ajoutées les zones drainées par les cours d'eau qui les alimentent de façon permanente, temporaire ou exceptionnelle. En dehors des événements de pluviométrie extrême, il n'y a pas de ruissellement de surface, mais pendant ceux-ci les eaux peuvent s'accumuler dans des plaines d'inondation caractérisées par une topographie plane et former des lacs temporaire (lac de Rives en 1996).

Critère Ka (degré de karstification)

Le critère Ka « degré de karstification » prend en compte :

- la typologie des systèmes karstiques telle que définie dans le guide Technique de l'AERMC intitulé « Bilan et analyse de la mise en oeuvre des procédures de protection des captages AEP en milieu karstique » [2006],

- les caractéristiques relatives à la fonctionnalité du système karstique : classification des systèmes karstiques selon l'analyse des courbes de récession (classification de Mangin), vitesse et taux de restitution des essais de traçage, variabilité temporelle du débit et des paramètres physico-chimiques.

La fonctionnalité d'un système karstique traduit la structure des vides résultant de la karstification mais également de l'organisation des écoulements. L'aquifère est alors fonctionnel, caractérisé d'une part par l'existence de vitesses d'écoulement souterrain très rapides (jusqu'à quelques centaines de m.h^{-1}) et par une variabilité spatio-temporelle des caractéristiques physiques et hydrauliques de l'aquifère. De plus le caractère unaire ou binaire du système karstique est également pris en compte dans la définition de ce critère.

Le critère Ka est résumé ci-dessous :

Ka1 : degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 1 ($< 10\text{km}^2$, Q moyen annuel faible) et uniquement si le système karstique est caractérisé par un comportement peu fonctionnel (faible variabilité du débit et des paramètres physico-chimiques), et en l'absence de preuves ou d'indices de circula-

tion rapide.

Ka2 : degré de karstification correspondant soit aux systèmes karstiques de type 2 ($> 10 \text{ km}^2$) ou de type 3, unaires et peu fonctionnels (fonctionnalité est appréciée à partir d'indices caractérisant le degré de karstification tels que des vitesses de traçage artificiel rapides, la variabilité du débit et de la chimie de la source), soit à des systèmes complexes tels que définis dans la classification de Mangin (domaine de référence 1).

Ka3 : degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques du type 2 ou 3, fonctionnels et binaires/unaires ; il s'agit soit de systèmes karstiques binaires peu fonctionnels ou unaires très fonctionnels. Le réseau karstique de ce type de systèmes karstiques est bien développé avec la présence d'un drain collecteur de petite taille connu connecté avec la surface. Les vitesses de transit mises en évidence à l'aide d'essais de traçages sont importantes (entre 50 et 100m/h). Domaine de référence 2 de la classification de Mangin.

Ka4 : degré de karstification correspondant aux systèmes karstiques binaires du type 2. Le réseau karstique très bien développé avec la présence d'un gros collecteur connecté avec la surface, comme l'atteste la fonctionnalité du système. Les vitesses de transit mises en évidences à l'aide d'essais de traçage sont importantes ($> 100\text{m/h}$). Domaines de référence 3.

1.2 Poids des paramètres et classes de vulnérabilité

Le calcul de l'indice de la vulnérabilité globale V_g se fait sur la base de la formule suivante :

$$V_g = iI_{0-4} + rR_{1-4} + pP_{0-4} + kK_{1-4} \quad (5.1)$$

La somme des poids affectés est égale à 1. Ils sont présentés sous forme de pourcentage.

Des valeurs de pondération sont données pour chacun des critères, avec la règle suivante : la somme des pondérations des critères relatifs au fonctionnement de l'aquifère karstique (K et I) est comprise entre 50 et 65% alors que la somme des pondérations des critères relatifs à la structure de l'aquifère karstique (P et R) est comprise entre 35 et 50%. Les valeurs ne sont pas uniques, mais des intervalles de valeurs sont proposés, permettant à l'utilisateur de faire des tests, afin d'évaluer la sensibilité des critères.

1.3 Classification de la vulnérabilité générale

Cinq classes sont définies à partir du calcul de V_g . La valeur finale de vulnérabilité varie entre 0 (vulnérabilité très faible) et 4 (vulnérabilité très forte) (Tableau 5.8).

Ces classes sont imposées pour être équidistantes. Il n'est pas nécessaire de chercher à faire apparaître toutes les classes de vulnérabilité sur la carte finale de vulnérabilité. Les classes ne seront pas générées automatiquement avec les options proposées

dans les logiciels de SIG. L'objectif de la méthode PaPRIKa est de permettre une comparaison entre sites, certains seront fortement vulnérables et d'autres moins, reflétant la combinaison des critères.

Tableau 5.8 – Tableau des classes de vulnérabilité globale

Valeurs	indice	Classe Vulnérabilité
3,2 – 4	4	Très élevé
2,4 – 3,19	3	Elevé
1,6 – 2,39	2	Moyen
0,8 – 1,59	1	Faible
0 – 0,79	0	Très faible

2 Calcul des critères pour les sites d'études

2.1 La Roche Saint Alban

L'étude du système karstique de La Roche Saint Alban est considéré comme l'étude référence, la méthodologie appliquée sur ce site est la même pour les autres sites. Dans le cas où il y aurait des différences, celles-ci seront détaillées en début de paragraphe.

Critère P (Protection)

Le critère protection se subdivise en 3 autres critères : le sol, l'épikarst et la zone non saturée.

Le critère sol (Figure 5.1 a) s'est fondé sur les observations locales issues des campagnes de terrain. Elles nous ont permis de mettre en évidence une forte corrélation entre la végétation présente et la nature du sol. Les observations ont été ensuite croisées avec les données des formations superficielles de la carte géologique. Pour la carte de végétation, les forêts de feuillus et les forêts mélangées possèdent généralement un sol plus ou moins épais en fonction du faciès de la roche mère. Cependant, nous avons vu que sur un calcaire massif (Kimméridgien) pouvait se développer le type organosol et sol brun. Par souci de simplicité nous avons donné, dans ce cas, un indice de vulnérabilité moyen (2). La forêt de conifères a été dotée d'un indice de vulnérabilité plus important (3), car, le sol n'y est que très peu développé. Les formations superficielles consistent essentiellement en des éboulis et dépôts glaciaires, leur épaisseur étant importante (pouvant dépasser le mètre), nous avons choisi un indice de vulnérabilité faible (1).

La définition du critère épikarst est basée sur la carte géologique et les observations sur le terrain (Figure 5.1 b). Le Valanginien étant représenté par des marnes, il n'existe donc pas d'épikarst dans ce niveau. Pour les calcaires, nous avons considéré que dans le Kimméridgien, très massif, se développe un épikarst peu épais voire absent localement et que ce faciès est donc d'une vulnérabilité plutôt élevée (3). Le

Portlandien étant plus fracturé, nous avons considéré que l'épikarst est plus développé et donc moins vulnérable (2).

Le dernier critère concernant la zone non saturée a été défini selon le faciès de la roche (Figure 5.1 c). Nous avons choisi de mettre un indice fort (3) de vulnérabilité pour les calcaires et un indice nul (0) pour les marnes valanginiennes. Toutefois, le critère de la zone non saturée ne prend pas en compte le dénivelé du bassin d'alimentation. Le site de La Roche Saint Alban se répartit sur 1000 m de dénivelé (de 500 à 1500 m d'altitude) entraînant un gradient de l'épaisseur de la zone non saturée difficilement identifiable. Le critère P (Figure 5.1 d) est donc l'association des trois autres critères et est défini comme le plus protecteur des trois. Au final, le centre du bassin d'alimentation possède une vulnérabilité moyenne alors que le bas et le sommet sont définis comme très faiblement vulnérables.

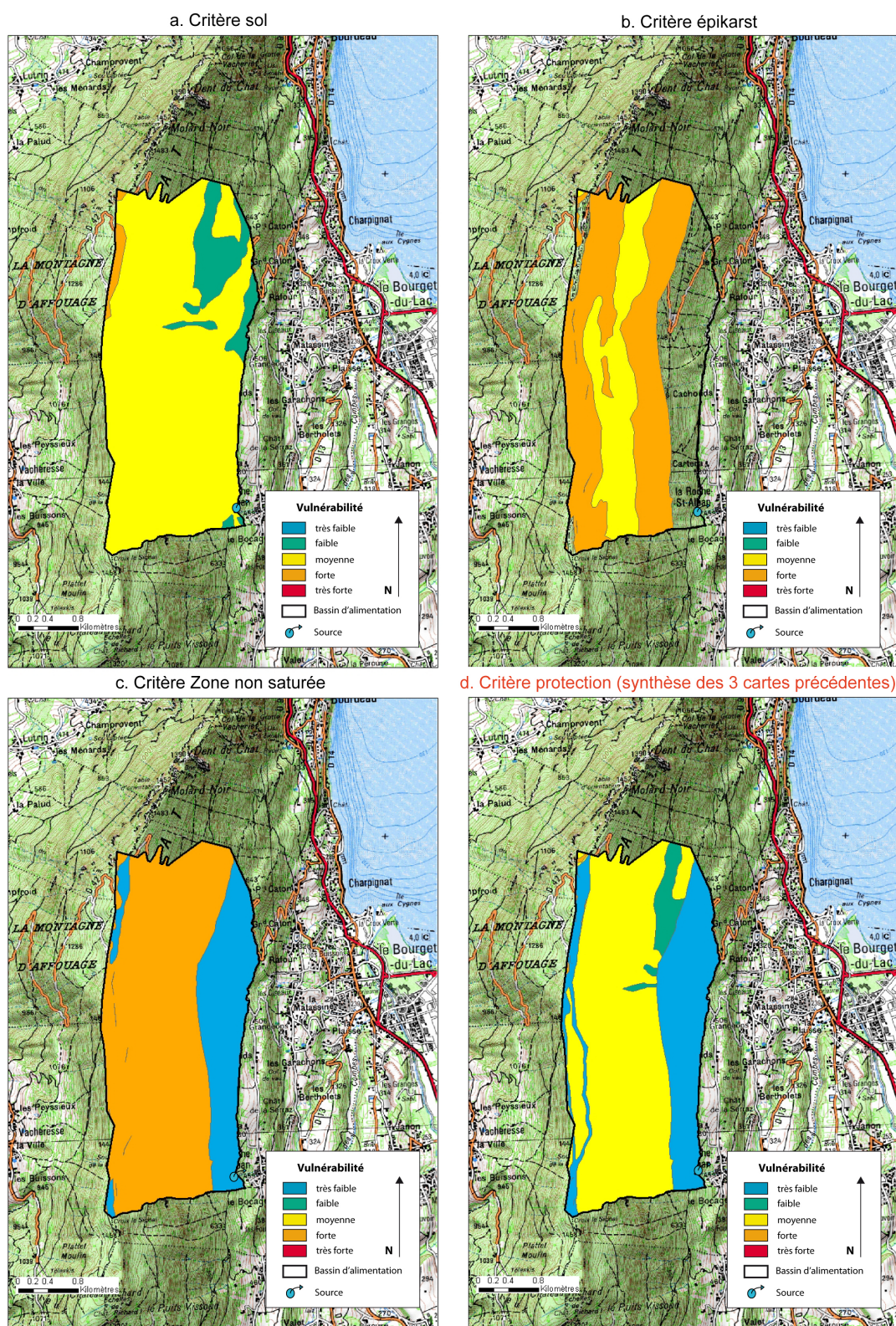


FIGURE 5.1 – Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban

Critère R (Roche)

Le critère R se fonde sur les faciès géologiques de la roche du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban. Cinq types de formation sont identifiés et sont présentés avec leur niveau de vulnérabilité dans le tableau 5.9 :

Tableau 5.9 – Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban

Formation	Faciès	Classe Vulnérabilité
Purbeckien	calcaires marneux	2
Kimméridgien	calcaires	3
Portlandien	dolomies calcaires	3
Valanginien	marnes	1
Eocène	marno calcaires	2

Nous observons (Figure 5.2) que le centre du bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban présente une vulnérabilité moyenne à forte alors que le sommet et la base apparaissent comme faiblement vulnérable.

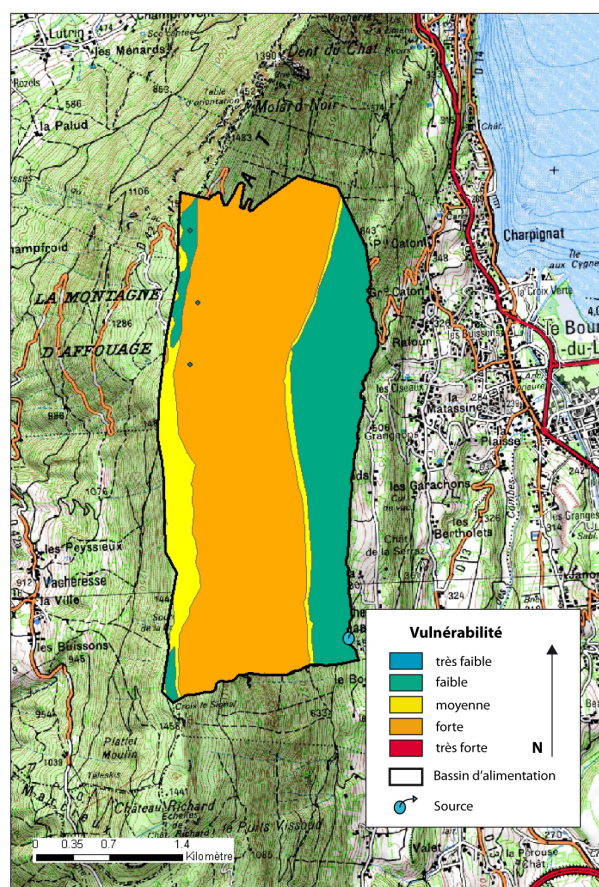


FIGURE 5.2 – Carte de vulnérabilité selon l'indice R du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban

Critère I (Infiltration)

Pour appliquer le critère I sur le bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban, nous avons utilisé un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au 25 m, afin de calculer et classer les pentes en fonction de leurs valeurs. Nous avons ensuite ajouté les avens et pertes identifiés dans le bassin versant et estimé les bassins d'alimentation de ces pertes. Au vu de la quantité de diaclases de grande taille présentes sur le bassin d'alimentation, nous avons décidé de les inclure à la carte. Le résultat (Figure 5.3) montre que la carte de vulnérabilité pour le critère infiltration est assez homogène. Comme les pentes sur le bassin d'alimentation sont comprises entre 15 et 50%, la vulnérabilité est définie comme faible. Seuls les sommets présentent une vulnérabilité moyenne liée à la faible pente mais aussi aux bassins de drainages des pertes.

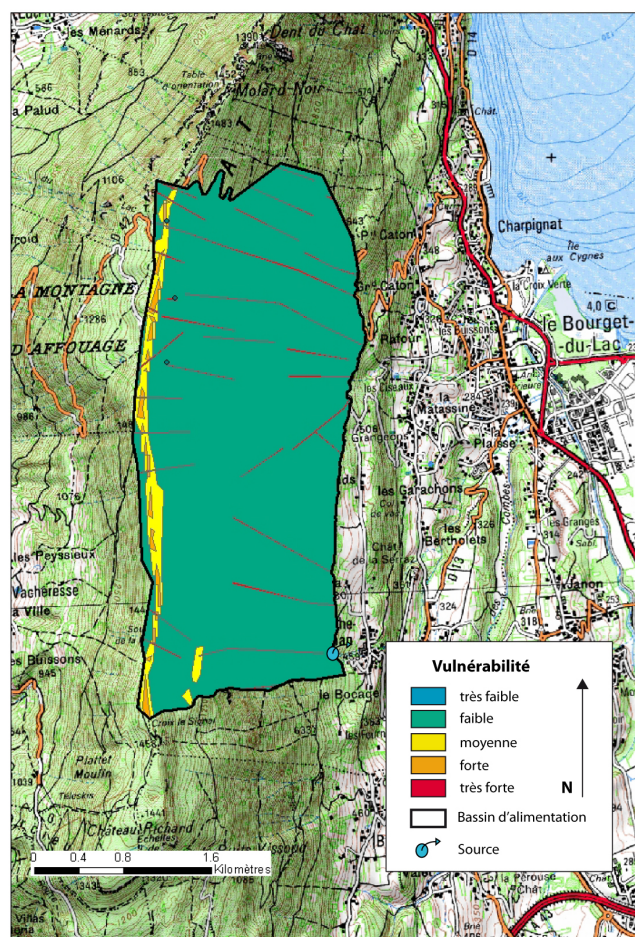


FIGURE 5.3 – Carte de vulnérabilité selon l'indice I du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban

Critère Ka (Karstification)

Le critère karstification se définit selon le degré de karstification, la taille, l'aspect fonctionnel ou encore l'aspect binaire ou unaire d'un système karstique. Dans le cas de La Roche Saint Alban, nous savons, d'après les analyses, qu'il s'agit d'un système karstique de petite taille, possédant une karstification très développée. Cependant, au vu des données de traçage que nous disposons (42 m.h^{-1} , Annexe X) et de l'absence de connaissance sur l'existence de drains spéléologiques bien développés, nous avons donc décidé de le mettre dans le domaine de vulnérabilité moyenne (Figure 5.4).

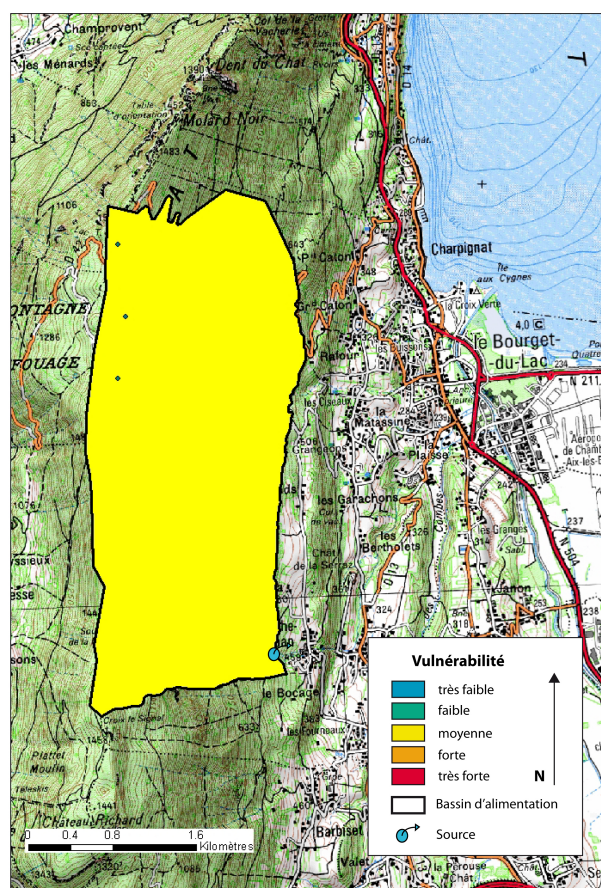


FIGURE 5.4 – Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban

Cartes de vulnérabilités finales

Les cartes finales de vulnérabilité ont été réalisées à partir de trois types de pondération dans le but de visualiser les zones à fortes variations. La pondération des quatre critères se trouve tableau 5.10.

Tableau 5.10 – Les trois jeux de pondérations utilisés pour combiner les quatre cartes de vulnérabilité

Exemple	P	R	I	Ka
1	0.2	0.2	0.4	0.2
2	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.2	0.2	0.3	0.3

Nous remarquons (Figure 5.5) que dans l'ensemble, les pondérations des critères n'influent que peu sur les résultats obtenus. Globalement, le bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban est faiblement vulnérable. Seul le centre et une partie du sommet du bassin possèdent une vulnérabilité moyenne. Toutefois dans l'exemple 2, une petite partie du sommet présente une vulnérabilité très faible. La présence de cette zone est due au critère P qui possède, pour cet exemple, sa pondération la plus forte.

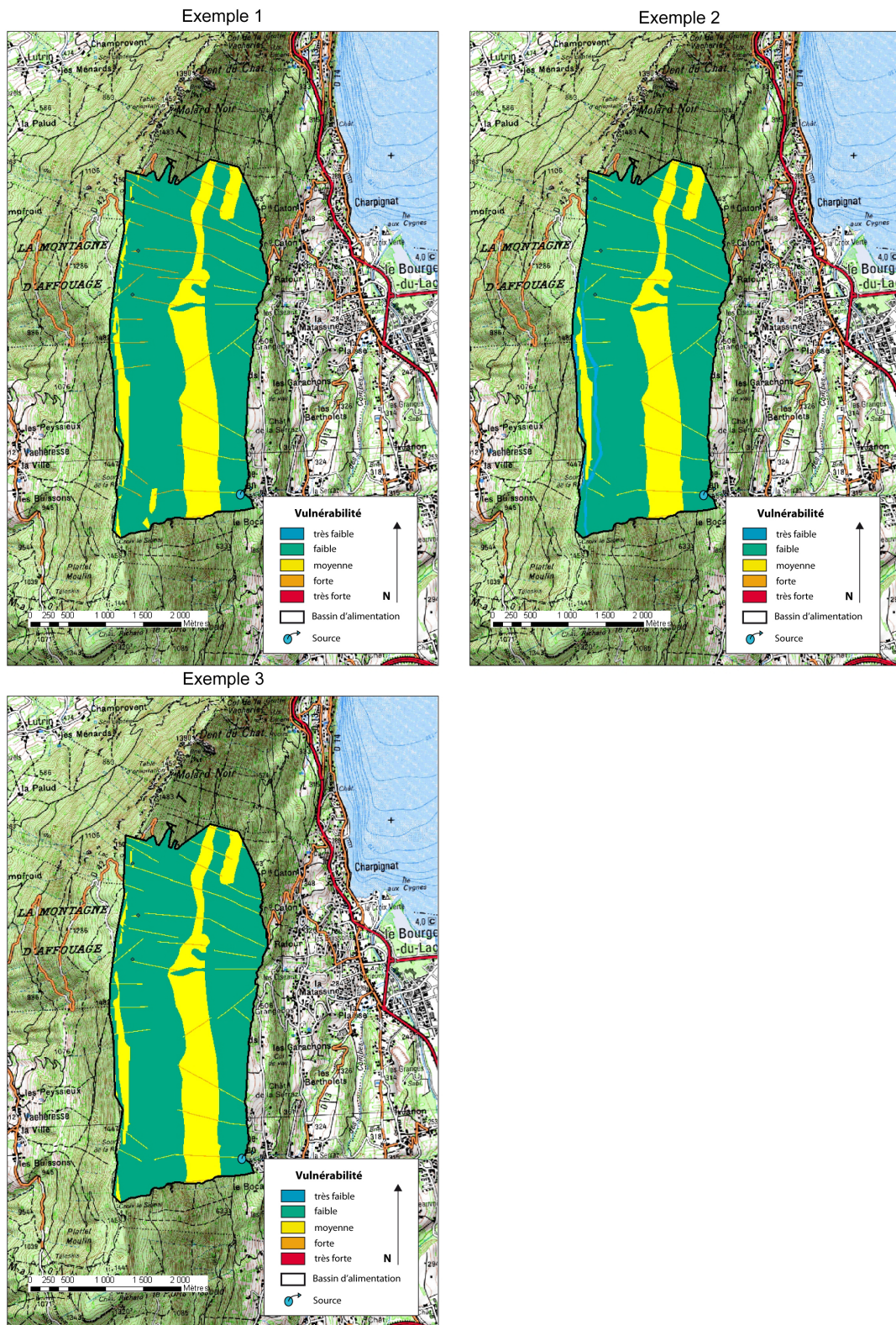


FIGURE 5.5 – Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban

2.2 La Combe à Saint Cassin

Critère P

Le critère protection se subdivise en 3 sous critères : le sol, l'épikarst et la zone non saturée. Nos connaissances sur l'étendue de l'épikarst et de la profondeur de la zone non saturée étant très limitées, nous avons abordé ces critères à partir de reconnaissances de terrain.

Pour définir la carte de vulnérabilité du critère sol (Figure 5.6 a), nous nous sommes basés sur les analyses de sol réalisées sur le bassin d'alimentation. La particularité de ce site est que chaque type de sol est fonction du faciès sur lequel il repose. Ainsi l'organosol se développe sur les calcaires du Valanginien et Berriasien. Nous lui avons attribué un indice fort de vulnérabilité (3). Sur l'Hauterivien marneux se forme un sol brun d'une forte épaisseur (60 à 80 cm), ce qui correspond à une faible vulnérabilité d'indice 1. Au final, la carte de vulnérabilité pour le critère sol est identique à la carte de vulnérabilité basée sur le faciès géologique.

La définition du critère épikarst (Figure 5.6 b) est basée sur la carte géologique. L'Hauterivien étant défini par des marnes, la présence d'un épikarst n'est donc pas possible. Nous avons considéré que les calcaires du Valanginien présentaient une vulnérabilité moins importante que les calcaires du Berriasien beaucoup plus fracturés. En considérant un épikarst peu épais (20 cm à 50 m), moyennement développé et discontinu, et une capacité de stockage en surface moyenne, l'indice de vulnérabilité des calcaires valanginiens est donc de 2. Pour les calcaires du Berriasien, les observations de terrain ont montré un épikarst peu épais ou absent localement, avec une faible possibilité de stockage temporaire, l'indice de vulnérabilité est fixé à 3.

Le dernier critère, concernant la zone non saturée (Figure 5.6 c), a été défini selon le faciès de la roche. Nous avons choisi de mettre un indice très fort (4) de vulnérabilité pour les calcaires du Valanginien du à leur fracturation, un indice fort (3) pour les calcaires du Berriasien moins fracturé et un indice nul (0) pour les marnes hauteriviennes. Toutefois, le critère de la zone non saturée ne prend pas en compte le dénivelé du bassin d'alimentation.

Le critère P (Figure 5.6 d) correspond à l'association des trois autres critères et est défini comme le plus protecteur des trois. Ainsi, la partie Est possède une vulnérabilité très faible, alors que la partie Ouest se compose d'une partie étant moyennement vulnérable, entourée de zones fortement vulnérables.

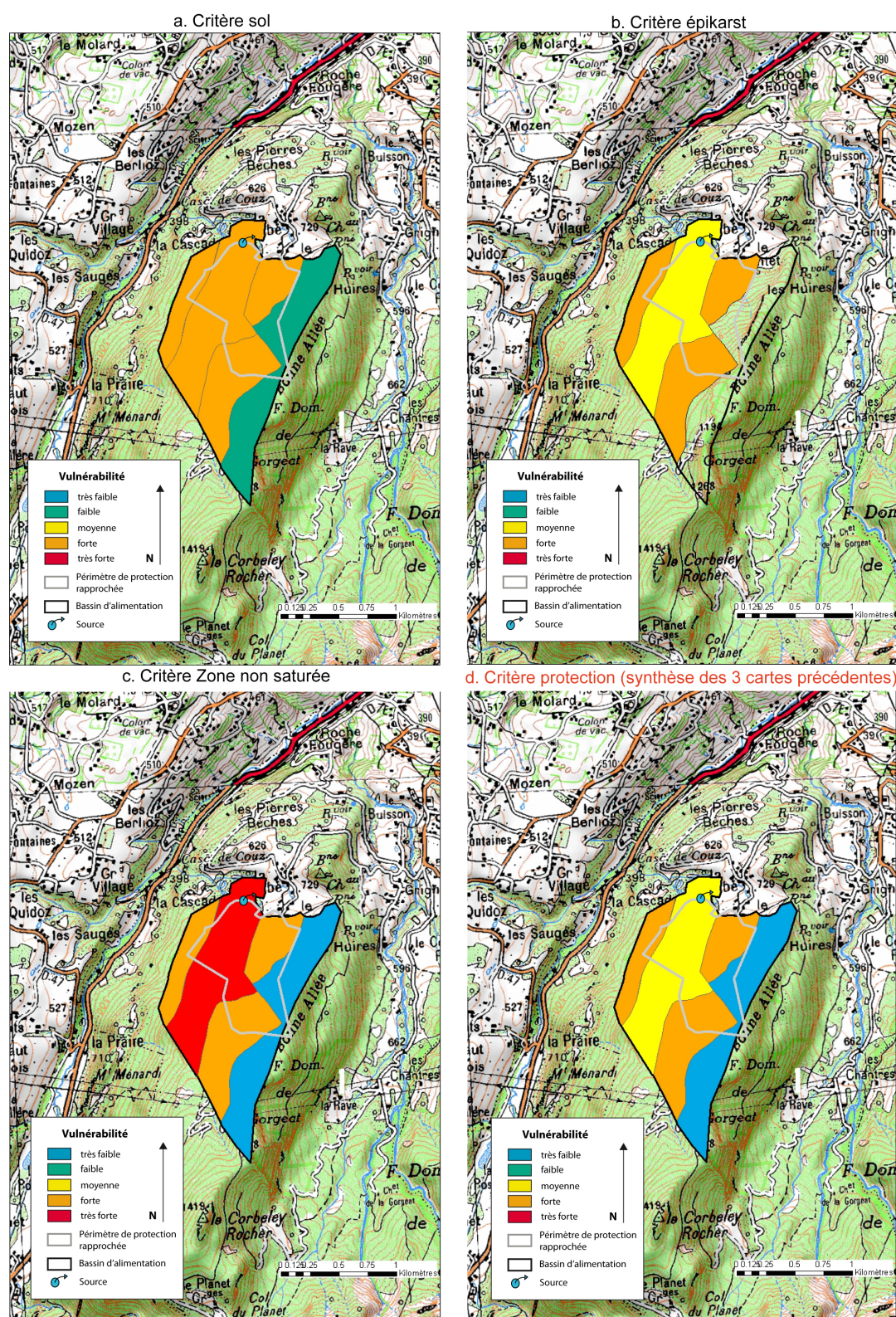


FIGURE 5.6 – Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe

Critère R

Le critère R a été obtenu à partir des informations géologiques présentées dans le tableau 5.11.

Tableau 5.11 – Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de La Combe

Formation	Faciès	Classe Vulnérabilité
Berriasien	calcaires	3
Valanginien	calcaires	3
Hauterivien	marnes	0

La carte de vulnérabilité du bassin d'alimentation de La Combe (Figure 5.7) montre que la partie Est est la moins vulnérable, les marnes confèrent une bonne protection. Les parties Ouest et centre apparaissent avec une forte vulnérabilité.

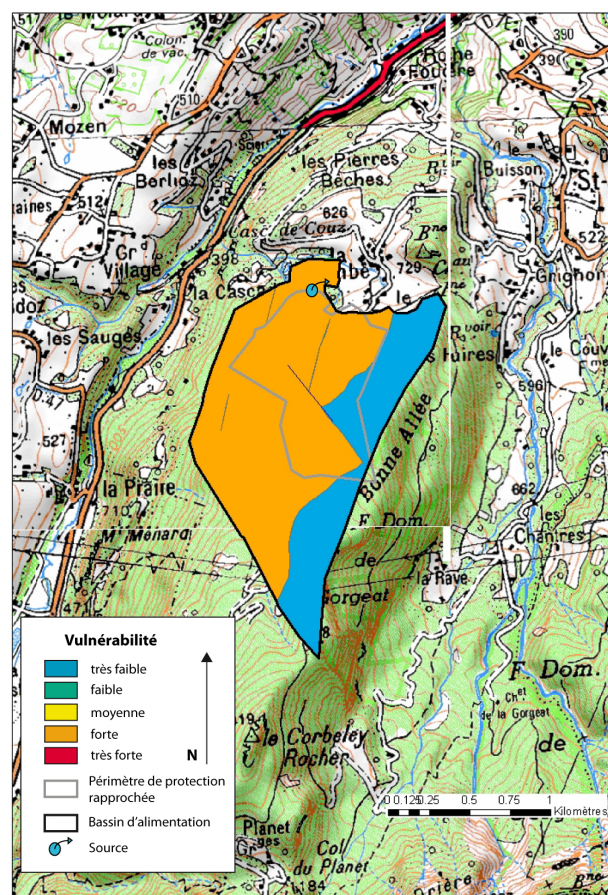


FIGURE 5.7 – Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe

Critère I

Le critère I a été évalué sur le système karstique de La Combe et nous remarquons sur la figure 5.8 que le bassin d'alimentation et le périmètre de protection rapprochée présentent essentiellement une faible vulnérabilité (indice 1). Ponctuellement, des zones de vulnérabilité moyenne (indice 2) sont identifiées. Cette faible vulnérabilité provient du fait que les pentes sur le bassin d'alimentation sont comprises entre 15 et 50%. Sur la zone d'étude, il n'existe pas de pertes ou d'avens reconnus.

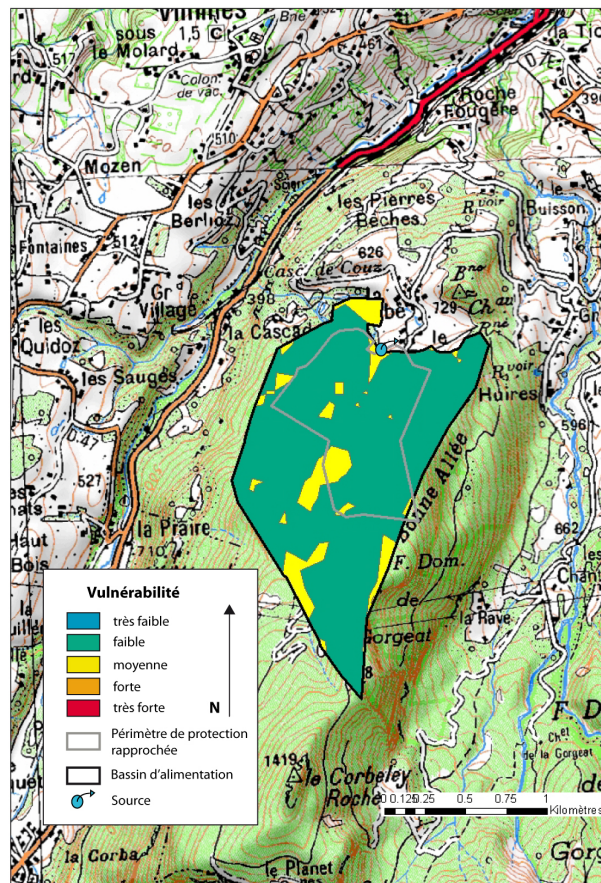


FIGURE 5.8 – Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe

Critère Ka (Karstification)

Le système karstique de La Combe est selon la classification de Mangin, un système qui se caractérise par un réseau de drainage très développé avec une zone noyée peu importante. Ainsi, le critère Ka pour ce bassin d'alimentation possède un indice de vulnérabilité de 3 (Figure 5.9), correspondant à une vulnérabilité forte.

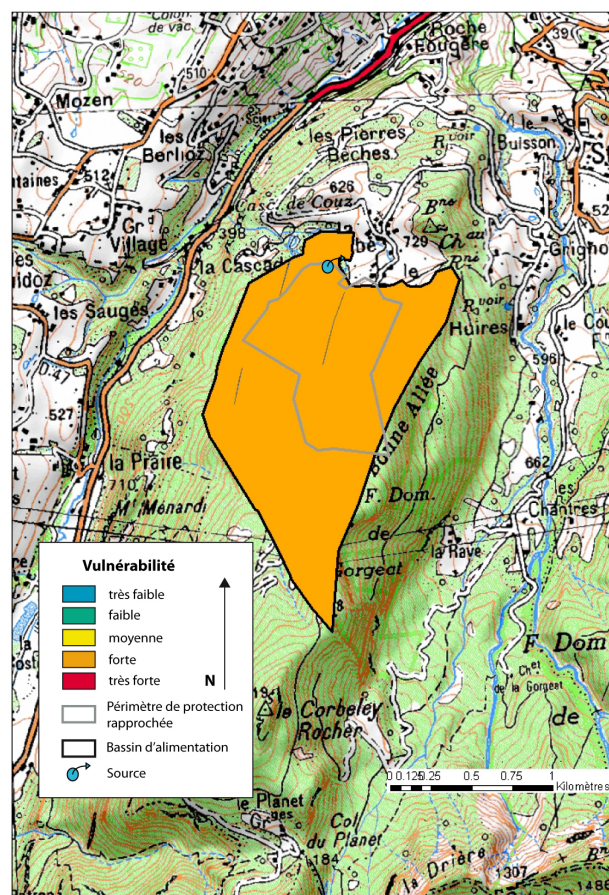


FIGURE 5.9 – Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe

Cartes de vulnérabilité finales

Pour réaliser les cartes finales de vulnérabilité, nous avons pris trois exemples de pondération définis pour l'étude de La Roche Saint Alban. La pondération des quatre critères est située tableau 5.10.

Les trois cartes finales sont présentées figure 5.10. Deux des trois cartes sont identiques, il s'agit de l'exemple 1 et de l'exemple 2. L'Est du bassin d'alimentation est considérée comme une zone de faible vulnérabilité alors que le centre et l'Ouest se partagent entre une vulnérabilité moyenne à forte. Les exemples 1 et 2 sont les plus intéressants et permettent une discrimination plus forte de l'entité. Dans l'exemple 3, la vulnérabilité forte des zones centre et Ouest n'apparaît plus, elle est remplacée par une vulnérabilité moyenne.

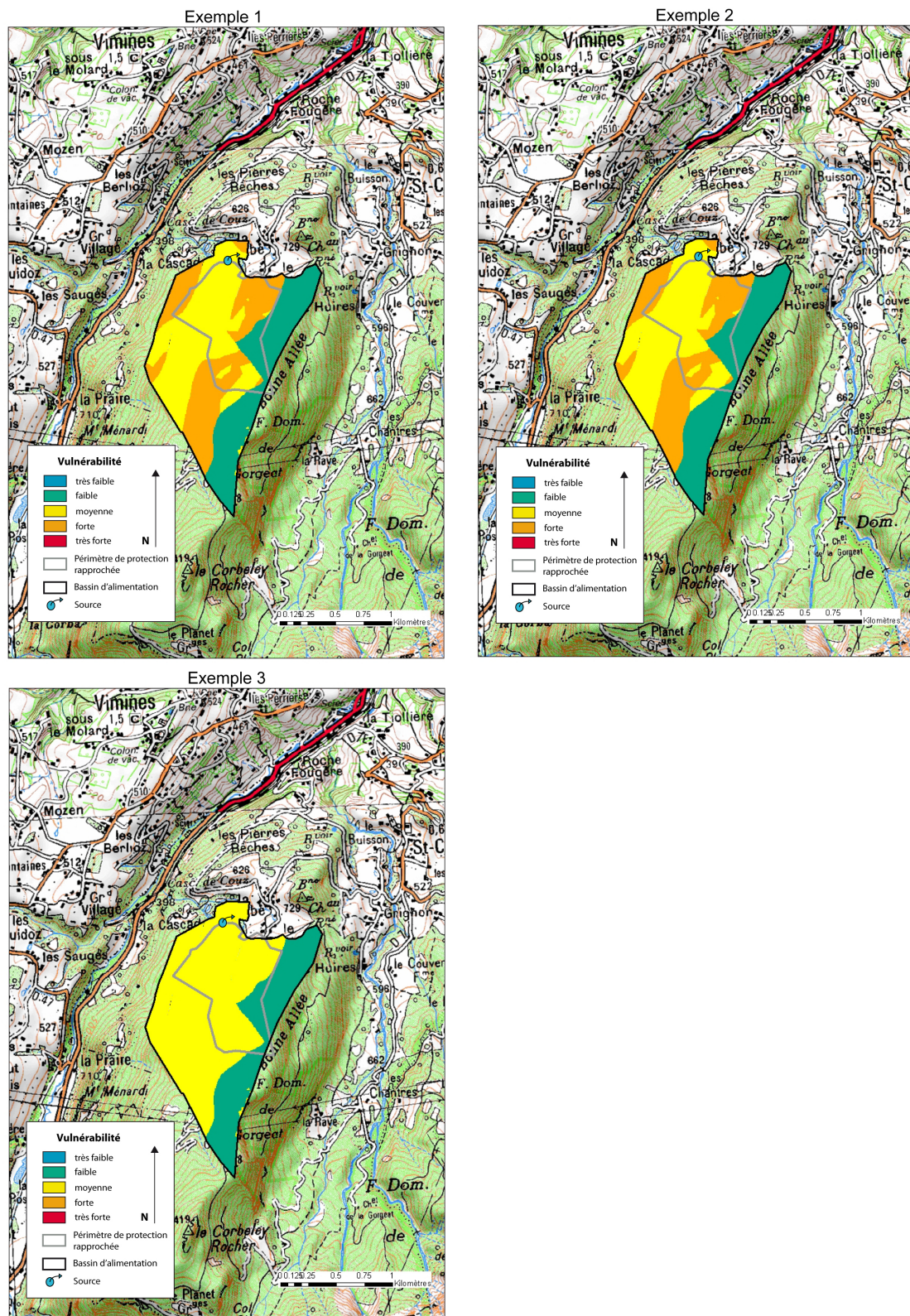


FIGURE 5.10 – Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de La Combe

2.3 Fontaine Noire à Saint Jean d'Arvey

Pour le système karstique de Fontaine Noire, nous avons choisi de ne pas nous limiter au périmètre de protection rapprochée mais d'étudier la vulnérabilité de tout le Mont Peney.

Critère P

Le bassin d'alimentation est composé de forêts de feuillus et mixtes possédant un indice de vulnérabilité moyen (2). Les forêts de conifères, les prairies et pâturages ont un indice de vulnérabilité fort (3). Enfin, la couverture superficielle composée de grès et d'argile sidérolithique d'épaisseur importante a été affectée d'un indice de vulnérabilité faible (1). Le résultat final (Figure 5.11 a) montre que le centre du Mont Peney est faiblement vulnérable. Le Nord, le centre Sud et l'Ouest sont fortement vulnérables alors que l'Est et le Sud n'est que moyennement vulnérable.

Dans les calcaires urgoniens, présentant une fracturation moyenne à forte, des zones non saturées peuvent se constituer localement. L'épikarst y est très peu épais ou absent localement. Nous avons proposé un indice de vulnérabilité de 3 pour cette formation calcaire (Figure 5.11 b).

La zone non saturée s'est vue attribuer un indice de vulnérabilité de 3 liée à la lithologie des calcaires en gros banc massif (Figure 5.11 c). Les cartes de vulnérabilité selon les critères de la zone non saturée et de l'épikarst sont strictement identiques.

La carte finale (Figure 5.11 d), définissant le critère de protection, est identique à la carte des sols. Pour ce système karstique, les critères épikarst et zone non saturée ne sont donc pas assez discriminant.

Critère R

Le Mont Peney est essentiellement caractérisé par des calcaires à faciès Urgonien, nous lui donnons une forte vulnérabilité avec un indice de 3 (Figure 5.12). A l'Est, une petite partie est composée de marnes hauteriviennes, l'indice de vulnérabilité est donc faible (1). Nous avons, en plus, ajouté une zone de très forte vulnérabilité (4) autour de 2 failles locales située à l'Ouest du bassin d'alimentation.

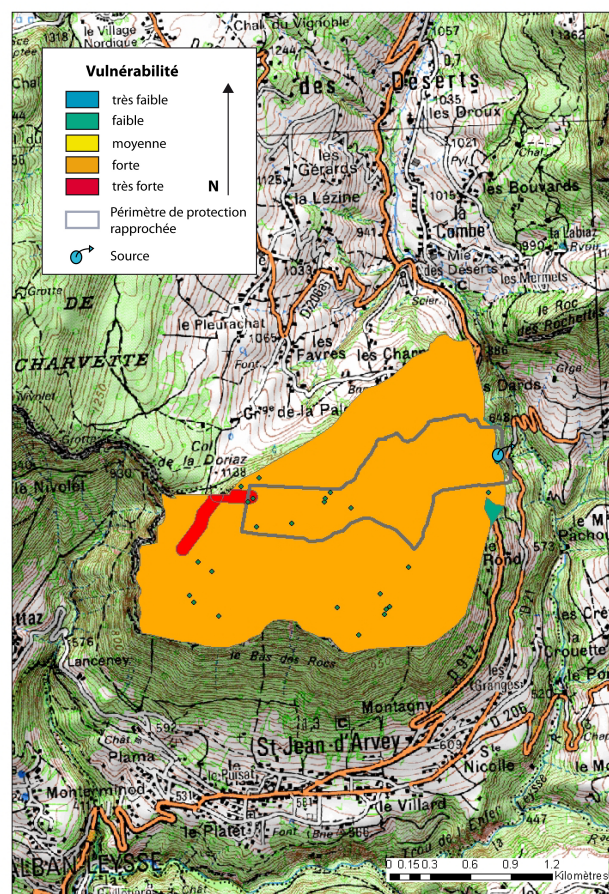


FIGURE 5.12 – Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire

Critère Ka

Le système karstique de Fontaine Noire est selon la classification de Mangin, un système qui se caractérise par un réseau de drainage très développé avec une zone noyée peu importante. Ainsi, le critère Ka pour ce bassin d'alimentation possède un indice de vulnérabilité de 3, correspondant à une vulnérabilité moyenne.

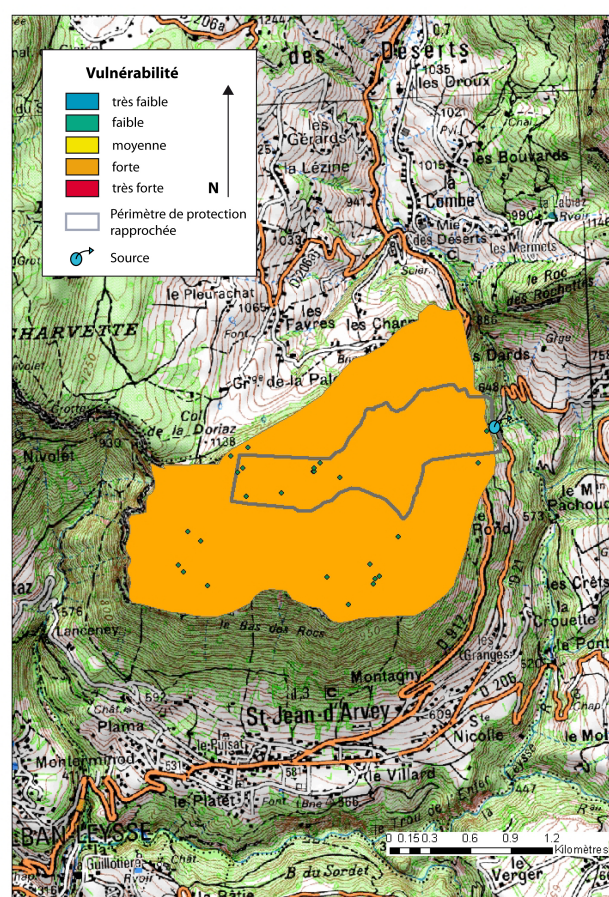


FIGURE 5.14 – Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire

Cartes de vulnérabilités finales

Les cartes finales de vulnérabilité ont été réalisées selon les trois choix de pondération précédemment utilisées du tableau 5.10.

Les trois cartes finales (Figure 5.15) ne montrent pas de différence à l'exception de petites zones locales. Globalement, l'ensemble du bassin d'alimentation est fortement vulnérable, avec des zones très forte liées aux pertes et des zones moyennement vulnérables liées à la présence d'argile. Les nombreuses zones de forte vulnérabilité du Mont Peney explique facilement les fortes valeurs de turbidité mesurées à l'émergence tout au long de l'année.

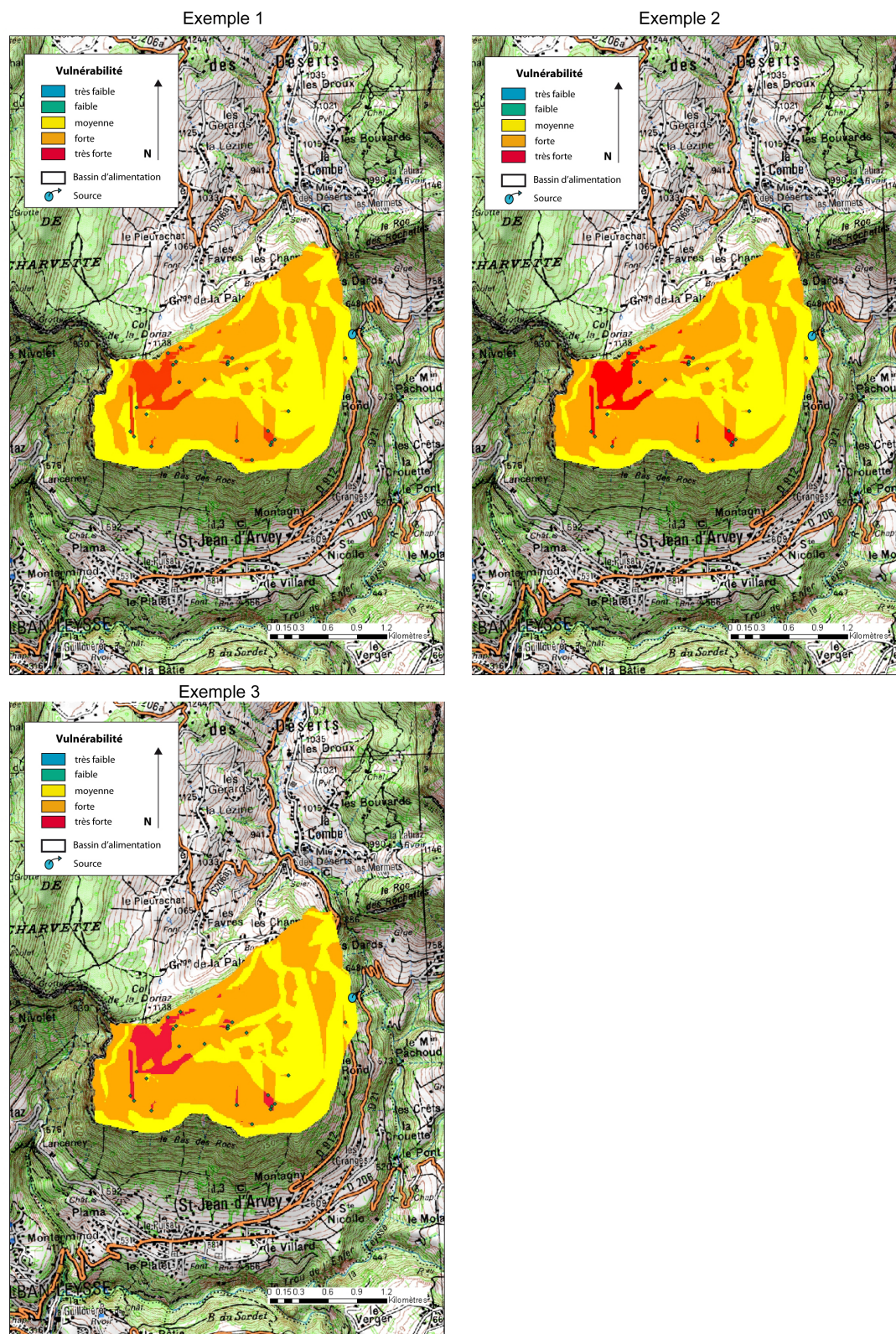


FIGURE 5.15 – Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Noire

2.4 Fontaine Froide des Echelles

Critère P

Le critère sol est présenté figure 5.16 a. Les forêts de feuillus et les forêts mixtes possèdent généralement un sol de type rendzine auquel nous avons donné un indice de vulnérabilité moyen (2). Les forêts de conifères, les prairies et les pâturages ont été dotés d'un indice de vulnérabilité plus important (3). Les formations superficielles consistent essentiellement en des éboulis et dépôts glaciaires. Leurs épaisseurs étant importantes (plusieurs mètres), nous avons donné un indice de vulnérabilité faible (1).

La carte de vulnérabilité selon le critère épikarstique (Figure 5.16 b) a été réalisée à partir des faciès géologiques du système karstique. Dans les calcaires de l'Urgonien, l'épikarst possède une épaisseur de 50 cm à 1 m, il est plus ou moins continu latéralement et peu stocker temporairement de l'eau à proximité de la surface, nous lui avons ainsi donné un indice de 1. Les calcaires marneux crétacés possèdent un épikarst peu épais, discontinu et peu développé, ils sont donc considérés comme fortement vulnérables, l'indice proposé est le 3.

La carte de vulnérabilité du critère zone non saturée (Figure 5.16 c) a, elle aussi, été basée sur les faciès géologiques. L'Urgonien est très massif et très fracturé, il est donc doté d'un indice de vulnérabilité de 4. Les calcaires crétacés ont un indice de 3 et les marno-calcaires présents ont un indice de 1.

La carte de vulnérabilité finale de protection (Figure 5.16 d) se présente dans l'ensemble comme faiblement vulnérable. Seules quelques zones sont moyennement ou fortement vulnérables.

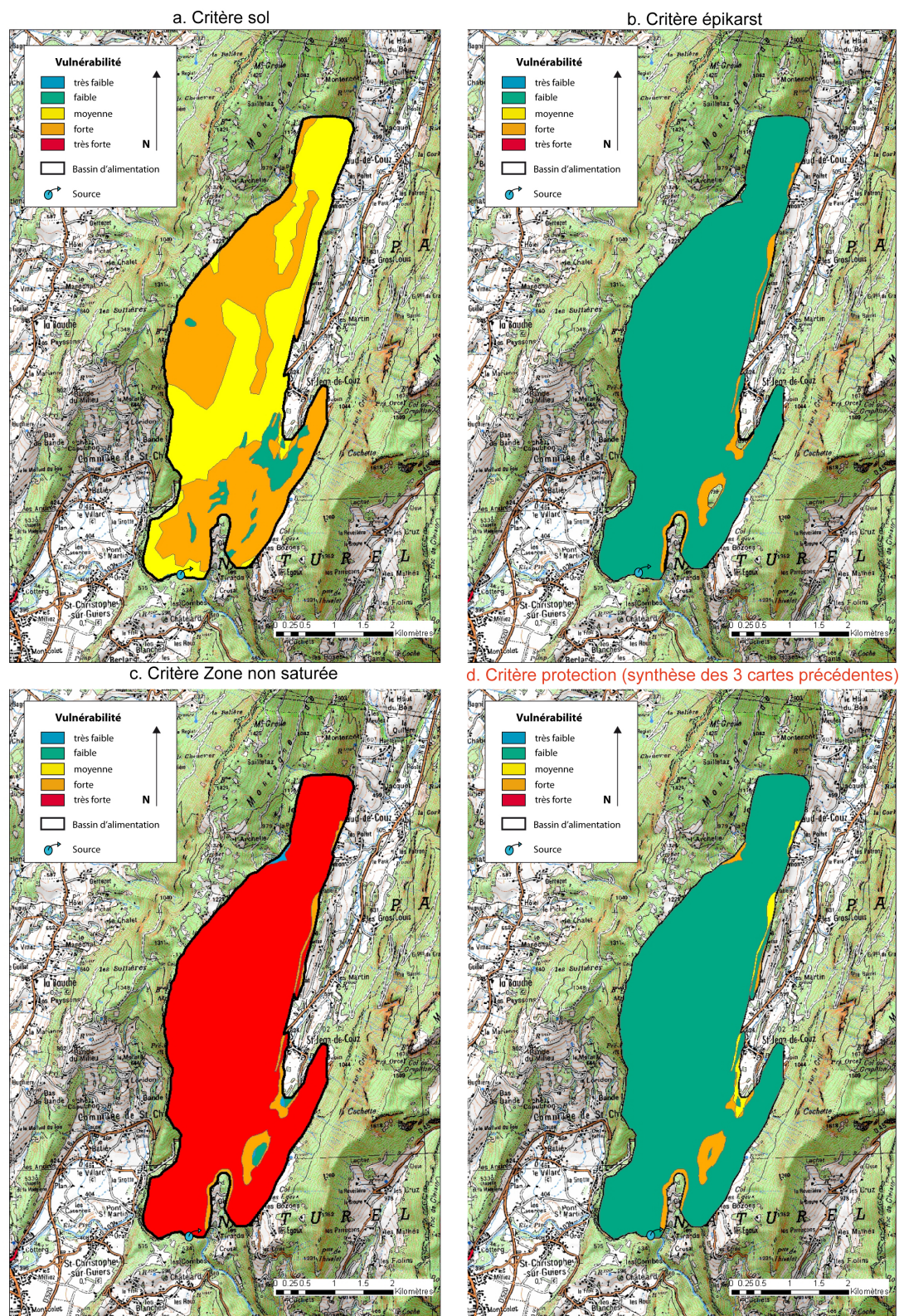


FIGURE 5.16 – Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide

Critère R

Le bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide présentent 3 principaux types de formation. Les faciès rencontrés sont résumés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12 – Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Fontaine Froide

Formation	Faciès	Classe Vulnérabilité
Crétacé supérieur	calcaires marneux	2
faciès Urgonien	calcaires	3
Hauterivien	marno-calcaires	1

La carte réalisée (Figure 5.17) montre que le système possède une vulnérabilité forte liée à la présence des calcaires abondants. Le Sud Est est défini par une vulnérabilité moyenne, voire forte ponctuellement.

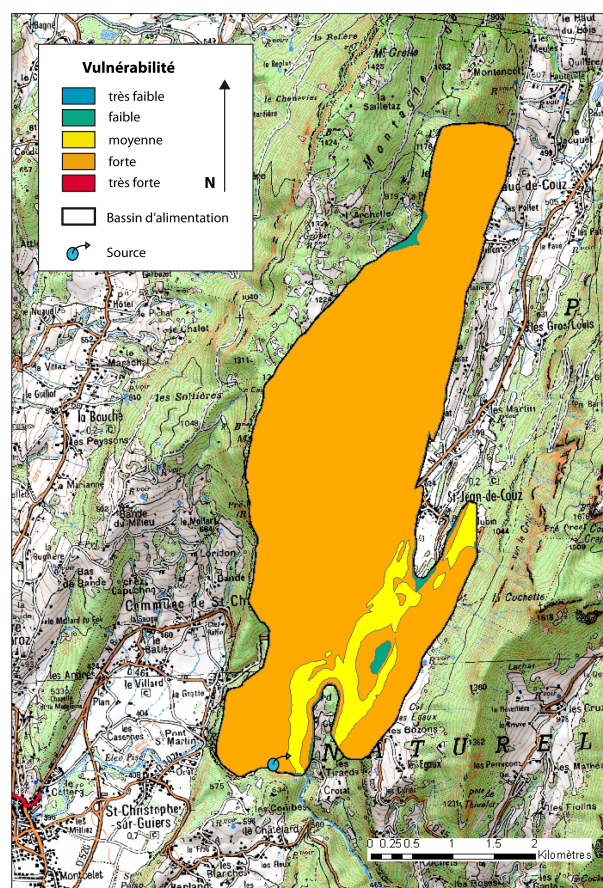


FIGURE 5.17 – Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide

Critère I

La figure 5.18 présente la carte de vulnérabilité du critère I. Nous observons principalement que la vulnérabilité est faible à très faible, les pentes sont donc très importantes. Au Sud de la carte existent des zones où la vulnérabilité est moyenne à forte, les pentes y sont donc plus faibles. Sur le secteur d'étude, les bassins d'alimentation des pertes sont de petites tailles.

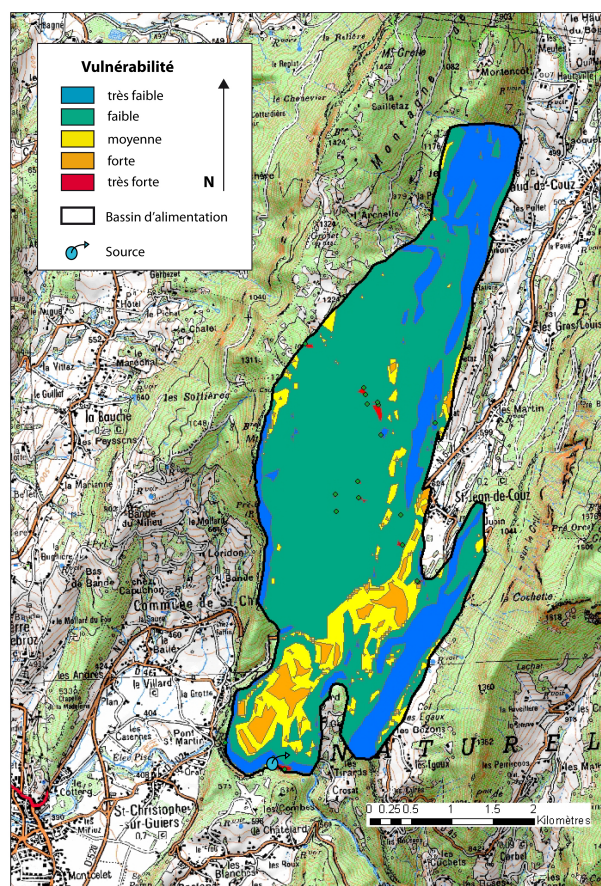


FIGURE 5.18 – Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide

Critère Ka (Karstification)

Le système karstique de Fontaine Froide est un système plus karstifié à l'amont qu'à l'aval présentant des retards à l'infiltration (type 2 selon Mangin). Ainsi, le critère Ka pour ce bassin d'alimentation possède un indice de vulnérabilité de 3, correspondant à une vulnérabilité forte. Nous avons complété sur cette carte par quelques réseaux spéléologiques topographiés considérés comme fortement vulnérables (4).

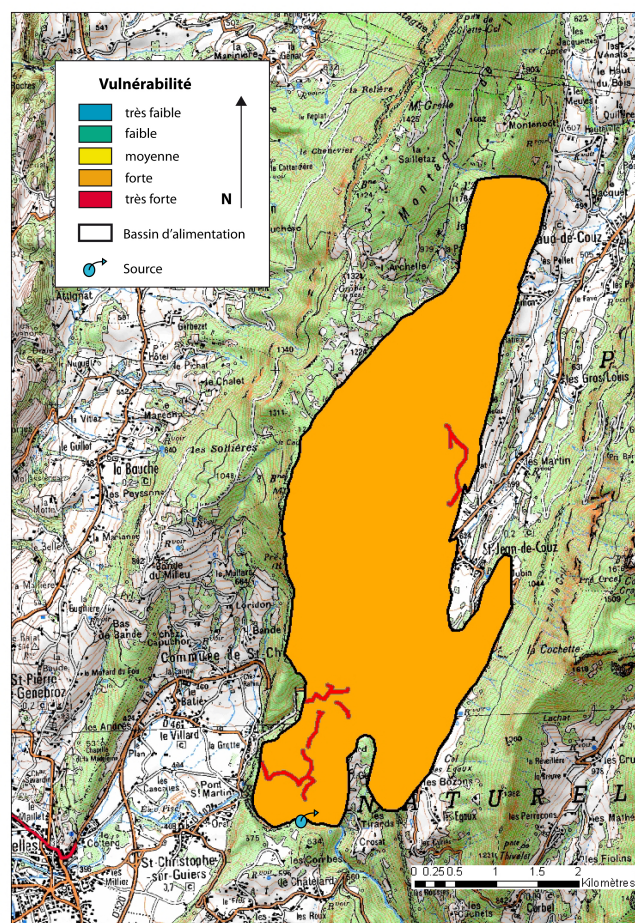


FIGURE 5.19 – Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide

Cartes de vulnérabilités finales

Les cartes finales de vulnérabilité sont fonction des pondérations définies dans le tableau 5.10.

Les exemples 2 et 3 des cartes finales (Figure 5.20) montrent encore une fois peu de différences. L'ensemble du bassin d'alimentation du système karstique est de vulnérabilité moyenne. Les zones où les drains sont présents ont une vulnérabilité forte. L'exemple 1, où la pondération du critère I est la plus importante, affiche des zones au Nord et au Sud - Est du bassin d'alimentation de faible vulnérabilité.

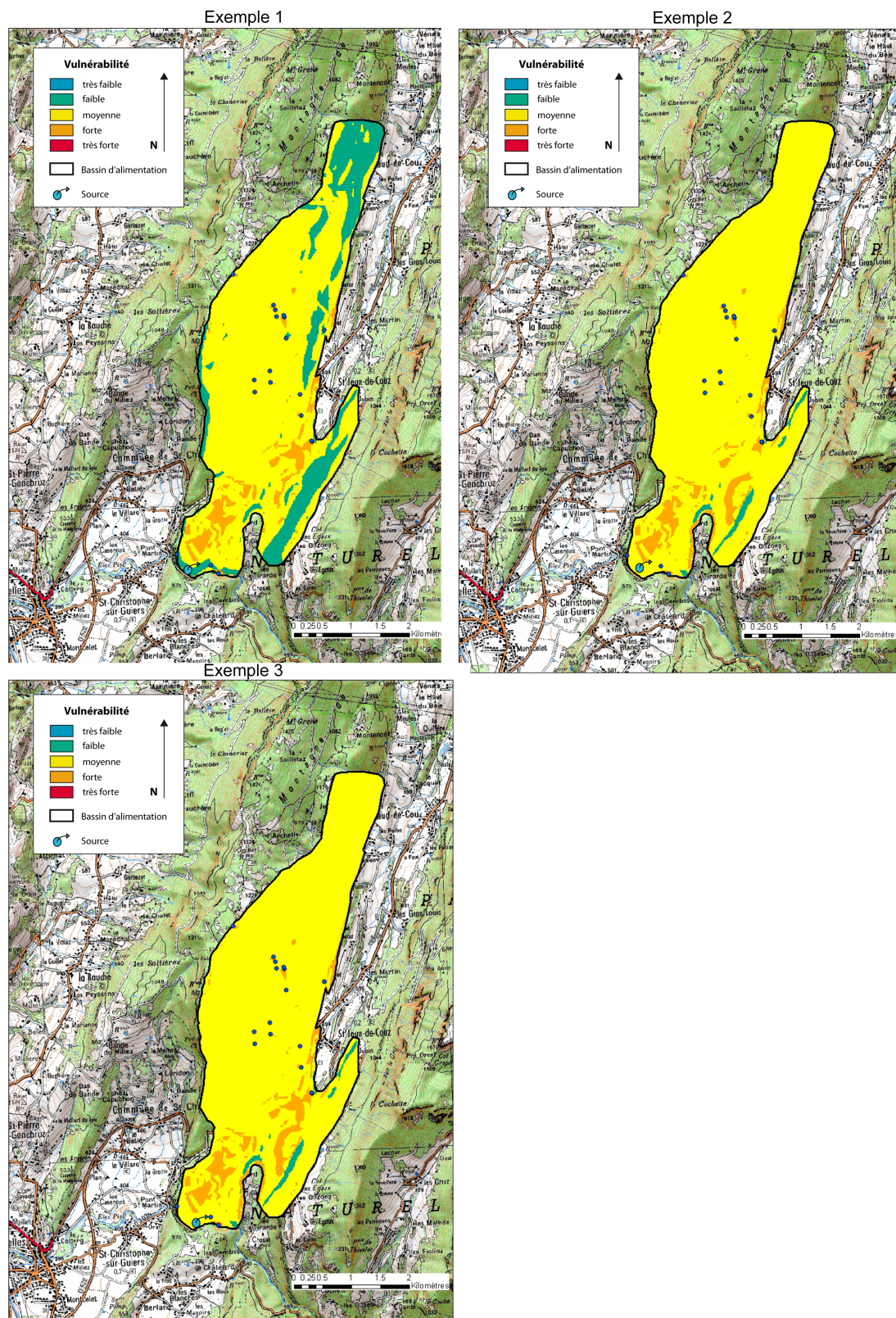


FIGURE 5.20 – Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Fontaine Froide

2.5 Bange - l'Eau Morte

Critère P

Le critère protection se subdivise en 3 sous critères : le sol, l'épikarst et la zone non saturée. Le critère sol est proposé figure 5.21 a. Les forêts de feuillus et les forêts mixtes ont un indice de vulnérabilité moyen (2). Les forêts de conifères, les pâturages et les prairies ont été assignés d'un indice de vulnérabilité plus important (3). Les formations superficielles consistent en des éboulis et dépôts glaciaires et de molasses correspondant à un indice de vulnérabilité faible (1).

La carte de vulnérabilité selon le critère épikarstique (Figure 5.21 b) se définit en prenant compte deux formations calcaires. Le faciès urgonien où l'épikarst est plus ou moins continu latéralement et peu stocker temporairement de l'eau à proximité de la surface, il possède ainsi un indice de vulnérabilité faible (1). Le second faciès est de type calcaire gris ou roux à rognon de silex, ici, l'épikarst est moyennement développé et discontinu avec une capacité de stockage en surface moyenne, ce faciès possède donc un indice de vulnérabilité moyen (2).

La carte de vulnérabilité selon le critère zone non saturée est présentée figure 5.21 c. Les formations urgoniennes étant épaisses, très développées et très fracturées ont reçu un indice de vulnérabilité fort (4). Les calcaires du Barrémien inférieur, moins fracturés et développées que les calcaires de l'Urgonien, possèdent un indice de vulnérabilité moyen (3). Enfin les marnes hauteriviennes de forte épaisseur ont un indice de vulnérabilité très faible (0).

La carte finale du critère P (Figure 5.21 d) montre que dans l'ensemble, le bassin d'alimentation de la source karstique de Bange - l'Eau Morte est très peu vulnérable. Le côté Ouest est très faiblement vulnérable et la partie Est faiblement vulnérable. Seul le centre est considéré comme moyennement vulnérable. Néanmoins, quelques zones au Nord et à l'Est sont définies comme très vulnérables.

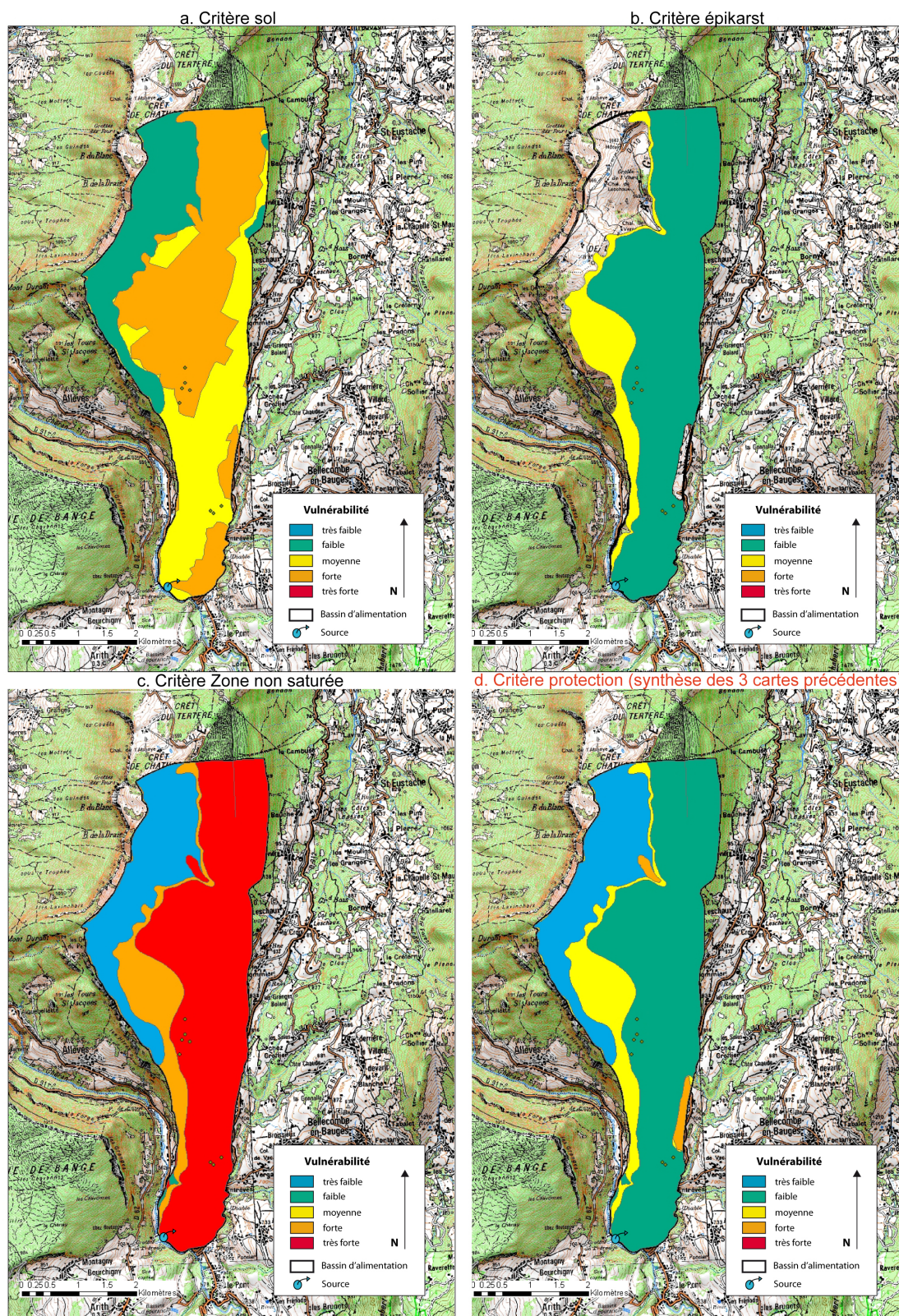


FIGURE 5.21 – Cartes de vulnérabilité selon le critères Protection (d), synthèse des paramètres les plus protecteurs des cartes de vulnérabilité des critères sol (a), épikarst (b), zone non saturée (c) du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

Critère R

les différents faciès associés aux niveaux de vulnérabilité sont présentés dans le tableau 5.13 :

Tableau 5.13 – Vulnérabilité en fonction des faciès identifiés sur le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte

Formation	Faciès	Classe Vulnérabilité
Crétacé Sup.	calcaires	2
Urgonien	calcaires	3
Hauterivien	marnes	0

La carte de vulnérabilité selon le critère roche (Figure 5.22) montre deux catégories de vulnérabilité :

- ◇ très faible à l'Est due à la présence de marnes ;
- ◇ forte à l'Ouest liée aux calcaires de l'Urgonien.

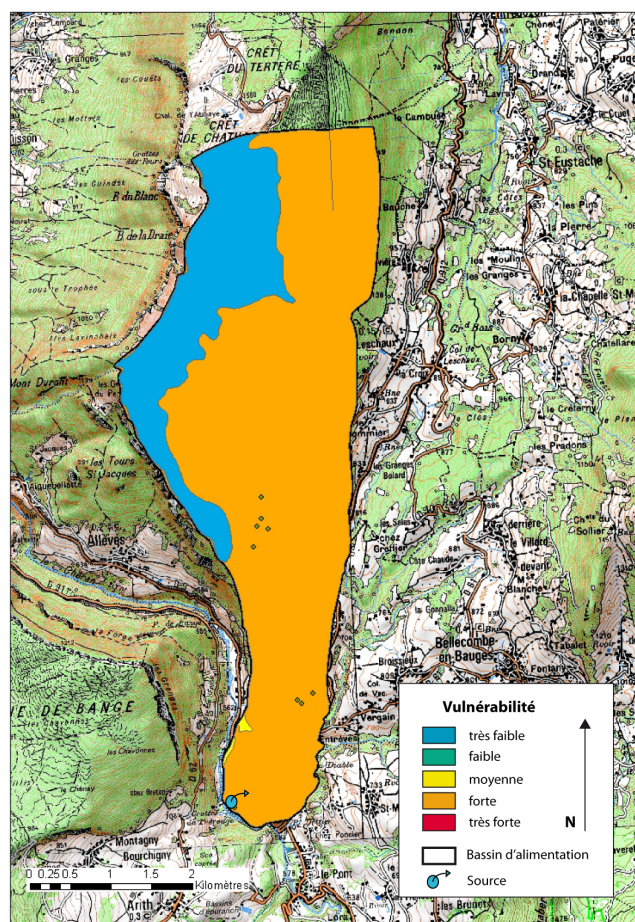


FIGURE 5.22 – Carte de vulnérabilité selon le critère R du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

Critère I

Le résultat du critère I (Figure 5.23) montre que le bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte est essentiellement de faible vulnérabilité. Cependant deux zones au Nord - Ouest et au Sud - Est sont définies par des vulnérabilités moyennes à faibles. Les bassins d'alimentation des pertes sont, dans le secteur, négligeables.

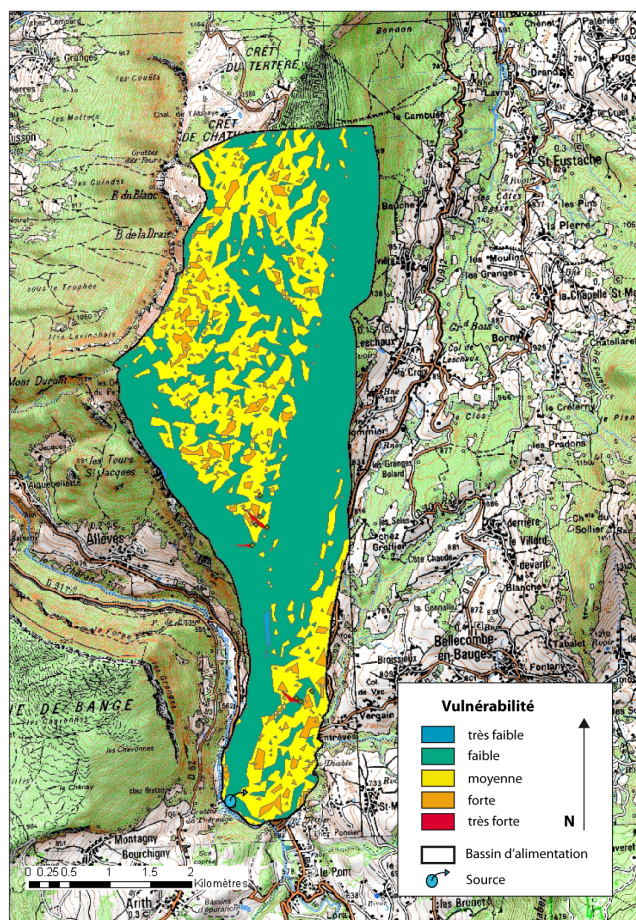


FIGURE 5.23 – Carte de vulnérabilité selon le critère I du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

Critère Ka

Le système karstique de Bange - l'Eau Morte se caractérise par un réseau de drainage très développé avec une zone noyée peu importante. Il est selon la classification de Mangin de type 2. Ainsi, le critère Ka pour ce bassin d'alimentation possède un indice de vulnérabilité de 2, correspondant à une vulnérabilité moyenne.

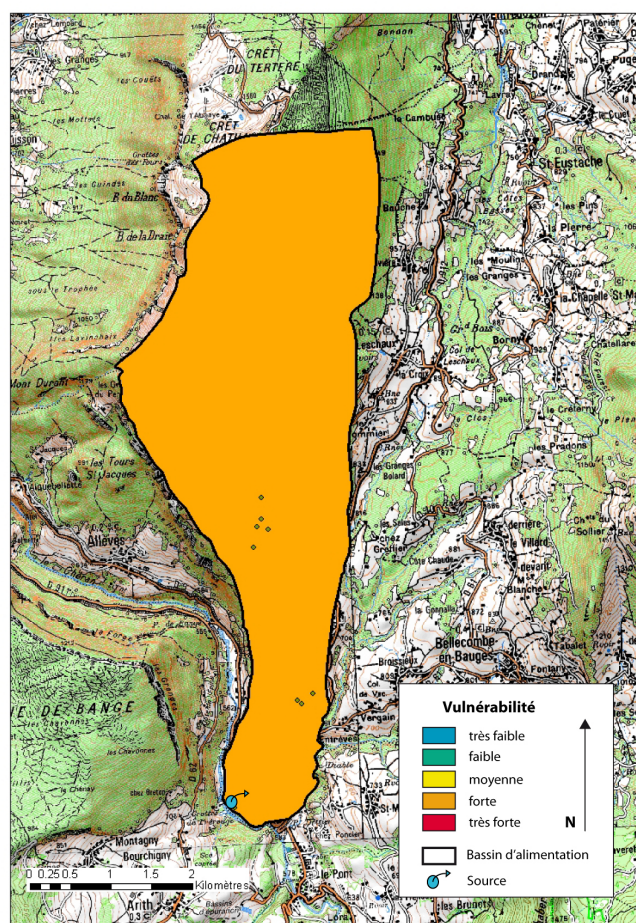


FIGURE 5.24 – Carte de vulnérabilité selon le critère Ka du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

Cartes de vulnérabilités finales

Les cartes finales de vulnérabilité sont réalisées selon les pondérations du tableau 5.10. Elles montrent dans l'ensemble deux grandes zones (Figure 5.25). La première à l'Ouest possède une vulnérabilité faible à moyenne en fonction de la pondération. Le reste de la carte présente une vulnérabilité essentiellement moyenne à forte. Le centre et le Sud correspondent à des zones de vulnérabilité forte, ces deux régions devront faire l'objet d'une protection plus surveillée.

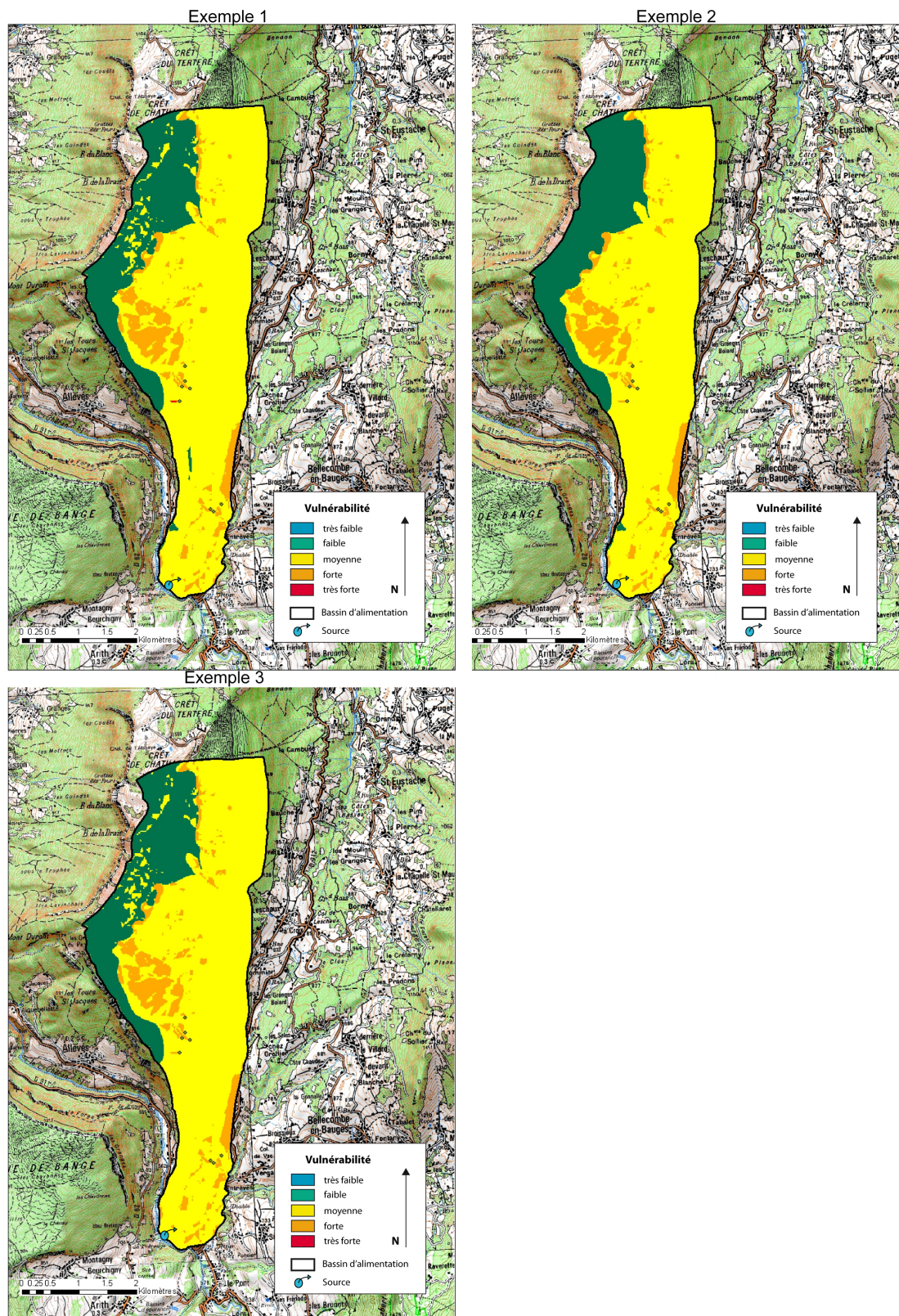


FIGURE 5.25 – Cartes finales de vulnérabilité du bassin d'alimentation du système karstique de Bange - l'Eau Morte

3 Conclusion : bilan de la méthode pour les petits bassins d'alimentation karstiques

La méthode PaPRIKa est généralement utilisée sur des karsts de taille relativement importante et dans des régions plus sèches (Méditerranée, grands causses). Pour la première fois, elle a été appliquée, ici, à des petits karsts de moyenne montagne. Nous allons donc détailler, critère par critère les particularités de la méthode appliquées aux karsts de moyenne montagne.

L'application du critère infiltration sur les bassins d'alimentation des sites d'étude montre des variations importantes (de faible à très fort) au niveau de la vulnérabilité. Ce critère s'adapte bien pour les petits karsts de montagne ne présentant pas de fortes pentes. Toutefois, nous pensons qu'il devrait tenir compte de la végétation jouant un rôle non négligeable sur l'infiltration. Bien que les pentes des bassins d'alimentation soient fortes ($> 15\%$), le ruissellement n'est pas important dans la région, l'eau s'infiltre facilement. Le ruissellement se produit surtout sur des karsts sans végétation. Pour les karsts de moyennes montagnes, il serait donc intéressant de réadapter les limites de classe des pentes car celle qui définit les pentes entre 15-50% est inappropriée.

Les systèmes karstiques étudiés ont une taille réduite, ils sont donc composés par des faciès lithologiques relativement homogènes. Pour le cas du mont Peney, le critère roche n'est pas discriminant car le site est essentiellement composé de calcaires urgoniens. L'application de ce critère aux autres sites permet de mettre en évidence les zones de vulnérabilités au sein des bassins d'alimentation. Ces derniers sont composés généralement par des marnes et des calcaires, les vulnérabilités des systèmes karstiques varient donc entre très faible et forte.

Le critère sol, dans les régions pré-alpines et jurassiennes, présente peu de variation au niveau de la vulnérabilité, elle est définie entre faible et forte. Ce critère n'est pas toujours pertinent. Dans le cas du système karstique de La Combe, le sol se développe en fonction du faciès sur lequel il repose. Pour ce site, le critère montre une redondance avec le critère roche. Pour les autres sites, il n'est pas assez mis en valeur, car le sol des forêts des moyennes montagnes est un bon épurateur face aux polluants. La pondération de ce critère devrait être plus importante.

Les critères épikarst et zone non saturée peuvent être analysés ensemble. La présence de la végétation très abondante ne permet pas de déterminer si la roche calcaire sous-jacente est très fracturée. L'absence de piézomètres, la forte pente des bassins d'alimentation et les faciès lithologiques peu variés ne permettent pas d'estimer le niveau d'eau. Les indices de vulnérabilité oscillent, pour les deux critères, entre très faible et très fort. Toutefois, appliqués sur le site de Fontaine Noire, les deux critères ne sont pas pertinents car le site est composé d'un unique faciès géologique. Ils présentent une carte unie caractérisée par une vulnérabilité moyenne sur l'ensemble du mont Peney.

Composé des indices les plus protecteurs des critères sol, épikarst et zone non sa-

turé, le critère protection donne dans les cas de La Roche Saint Alban, de La Combe et de Bange - l'Eau Morte une carte nouvelles. Dans l'étude des sites de Fontaine Froide et de Fontaine Noire, la carte finale est identique à la carte du critère sol ou à la carte du critère épikarst. Nous proposons qu'à défaut de choisir l'indice le plus protecteur, le critère protection devrait être obtenu par pondération des critères sol, épikarst et zone non saturée, comme pour la réalisation de la carte finale. Pour les systèmes karstiques de moyenne montagne, le critère sol devrait avoir le coefficient de pondération le plus important ou faire l'objet d'un critère à part entière.

Les cartes réalisées à partir du critère karstification ne sont pas les plus pertinentes. Bien que les systèmes possèdent un degré de karstification élevé, elles ne présentent qu'une vulnérabilité faible ou moyenne basée sur les analyses des courbes de récession. Le critère propose d'ajouter les drains karstiques avec une très forte vulnérabilité. Toutefois, dans la région, les conduits karstiques sont bien connus et topographiés, mais ils représentent des drains fossiles, ils sont donc peu utiles pour les cartes de vulnérabilité.

En prenant l'exemple des résultats obtenus sur le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte, la méthode PaPRIKa ainsi appliquée ne semble pas prendre en compte les liens fonctionnels entre les zones. Certaines zones sans être visible en elle-même peuvent engendrer de la vulnérabilité en aval (en alimentant les pentes par exemple) et doivent donc faire l'objet de protection pour les activités humaines.

Malgré quelques points à redéfinir, la méthode PaPRIKa est un bon outil pour définir les zones en fonction du degré de vulnérabilité sur le bassin d'alimentation d'un système karstique de moyenne montagne. Elle peut permettre aux gestionnaires de l'eau de mieux évaluer la vulnérabilité d'un captage. Ainsi, si des travaux de sylviculture devaient avoir lieu sur le bassin d'alimentation d'un captage, la vulnérabilité face à un potentiel risque pourrait être plus facilement appréhendée. Nous aborderons dans le Chapitre 6, l'impact des activités sylvicoles sur les bassins d'alimentation de trois captages (La Roche Saint Alban, La Combe et Fontaine Noire) ayant fait une étude de la vulnérabilité par de la méthode PaPRIKa. Cette étude nous permettra d'évaluer les résultats de la méthode et d'en définir sa robustesse.

Chapitre 6

Vulnérabilité spécifique liée à la remobilisation anthropique ou naturelle des sols

1 Suivi des indicateurs pédologiques dans les eaux des systèmes karstiques étudiés

1.1 Validation du suivi en continu de la matière organique fluorescente

Le suivi de la matière organique fluorescente s'est effectué essentiellement sur deux sites : La Roche Saint Alban et La Combe. Pendant quelques semaines, l'émergence de la source karstique de Fontaine Noire a, elle aussi, été équipée. Cependant les données obtenues sur cette courte période ne sont pas exploitables. Le suivi de la matière organique a été réalisé à l'aide de deux fluorimètres de terrain GGUN-FL30©. Ce type de fluorimètre est initialement prévu pour repérer et caractériser la présence de fluorescence lors de campagne de traçage. Néanmoins, les deux fluorimètres ont été, ici, adaptés pour détecter la matière organique naturelle fluorescente. Deux catégories de matière organique sont observées dans les eaux karstiques des moyennes montagnes pré-alpines : le type humique et le type protéique. Le fluorimètre a donc été équipé d'un couple d'excitation et d'émission 250/400-700 nm pour les types protéiques et 310/300-700 nm pour le type humique.

Afin de vérifier que les fluorimètres détectaient les deux types de matière organique fluorescente, nous avons couplé les valeurs de suivi de l'appareil de terrain avec des mesures de fluorescence réalisées en laboratoire avec un spectrofluorimètre [Tissier *et al.* 2011b]. Dans ce cas d'étude, nous pouvons comparer les deux types de mesure. Bien que la première méthode mesure la totalité de la matière organique (dissoute et en suspension) alors que la deuxième ne mesure que les matières dissoutes, les eaux karstiques des sources étudiées sont caractérisées par un carbone organique dissous expliquant plus de 97 % du carbone organique total. La figure 6.1 présente le résultat du croisement des données obtenues par le fluorimètre de terrain à 310 nm et par le spectrofluorimètre de laboratoire à 330 nm. Nous observons que

pour le système karstique de La Roche Saint Alban (représenté par des ronds sur la figure) la corrélation entre les deux mesures est de 0.91, tandis que pour les données de La Combe (défini par les croix sur la figure) la corrélation est de 0.82 (Figure 6.1). Cette moins bonne corrélation peut s'expliquer par le fait que le fluorimètre de terrain a été installé dans un bac de décantation. A l'intérieur du bac, l'eau ne circule pas assez vite et les matières en suspension mettent plus de temps à être évacuées.

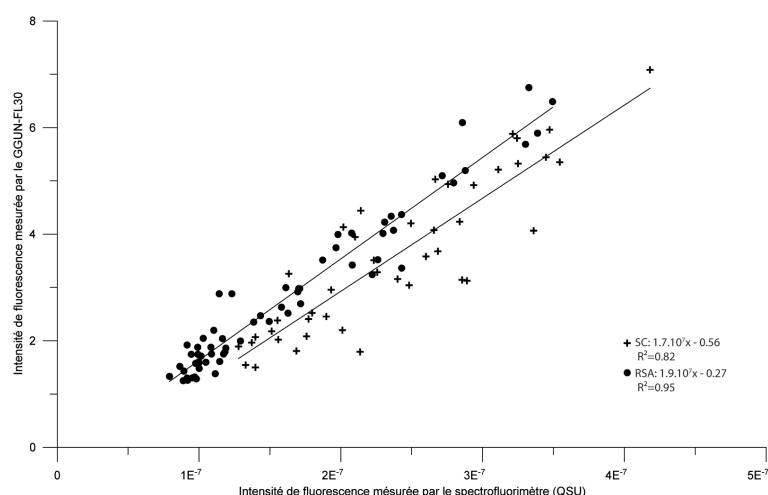


FIGURE 6.1 – Représentation de l'intensité du type humique suivi à 310 nm par le fluorimètre de terrain en fonction de la concentration du type humique mesurée en spectrofluorimétrie 3D (mol/L. QSU)

Le rendement quantique des photodiodes du fluorimètre de terrain a été superposé aux mesures du spectrofluorimètre (Figure 6.2). Nous pouvons observer (Figure 6.2 b) que le rendement quantique est assez bon pour la photodiode à 310 nm, ainsi il est possible de suivre en continu la matière organique du type humique (caractérisé par deux fluorophores Cf chapitre 3). Cependant, l'équipement du fluorimètre de terrain pour suivre les matières du type protéique n'a pas été possible. En effet, le rendement quantique de la photodiode est trop faible pour identifier le type protéique (Figure 6.2 a). La corrélation entre les mesures des photodiodes à 310 et 280 nm est de $R^2=0.98$.

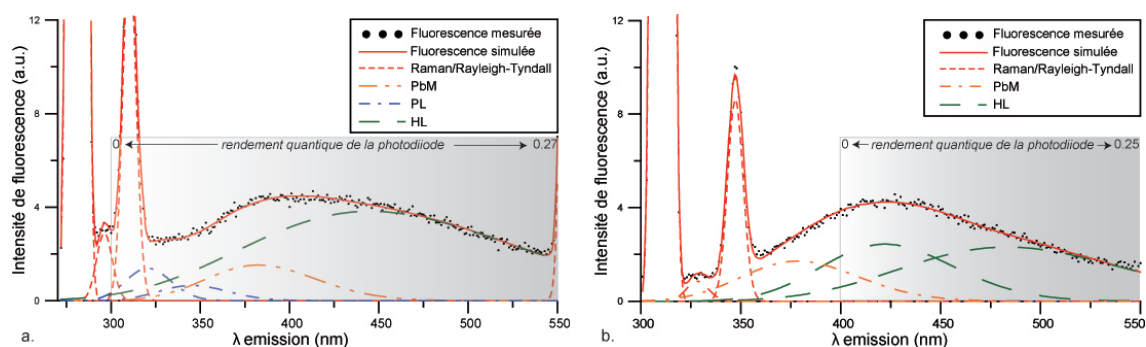


FIGURE 6.2 – Superposition du seuil de détection du fluorimètre de terrain avec les mesures du spectrofluorimètre (a.) à 280 nm et (b.) à 310 nm d'excitation Avec : PL=protéine like, HL=humique like, PbM=produit microbiologique

1.2 Etat des lieux des matières en suspension et dissoutes dans les eaux karstiques

1.2.1 Les espèces fluorescentes retrouvées dans les eaux karstiques

La recherche des matières organiques fluorescentes a été réalisée sur 4 sources karstiques de moyenne montagne. Tous les sites présentent les mêmes espèces fluorescentes avec des concentrations qui varient en fonction des sites. Les espèces fluorescentes sont présentées dans le tableau 6.1, elles sont caractérisées par les types tyrosines, tryptophanes, humiques et par des matières issues de la production microbiologique.

Tableau 6.1 – Présentation des espèces fluorescentes identifiées dans les eaux des sources karstiques de La Roche Saint Alban, La Combe, Fontaine Noire et Fontaine Froide.

Avec : *Ex*=excitation, *Em*=émission et *FWHM*=Full width at half maximum

site	Tyrosine			Tryptophane		
	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)
La Roche Saint Alban	280	320 ± 1.9	29 ± 2.8	280	345 ± 1.5	45 ± 2.9
La Combe Saint Cassin	280	320 ± 0.96	28.8 ± 3.2	280	344 ± 0.87	45 ± 2.05
Fontaine Noire St Jean d'Arvey	280	320 ± 0.85	30 ± 2.03	280	345 ± 0.75	45.35 ± 0.44
Fontaine Froide Les Echelles	280	320 ± 0.71	29.25 ± 1.7	280	345 ± 2.68	45.25 ± 1.12

site	Prod. microb.			humique		
	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)	Ex (nm)	Em (nm)	FWHM (nm)
La Roche Saint Alban	280	383 ± 1.6	72 ± 5	330	421 ± 3.6 482 ± 5.9	77 ± 5 130 ± 5
La Combe Saint Cassin	280	383 ± 0.66	71 ± 7.15	330	422 ± 2.4 483 ± 4.36	77.7 ± 2.6 132 ± 5.09
Fontaine Noire St Jean d'Arvey	280	383 ± 0.7	72.47 ± 0.38	330	421 ± 4.2 481 ± 5.9	73.84 ± 5.12 128 ± 4.3
Fontaine Froide Les Echelles	280	383 ± 1.34	72.04 ± 0.8	330	422 ± 2.34 483 ± 3.8	78.3 ± 4.7 131 ± 5.5

1.2.2 Relation des matières organiques fluorescentes - débit

a. La Roche Saint Alban

Nous avons vu, Chapitre 3, que le temps de réponse des systèmes karstiques était très rapide face aux précipitations (de quelques heures à quelques jours). Afin de comprendre le transfert de la matière organique, nous avons réalisé un corrélogramme croisé entre pluie/débit et pluie/matière humique. Le corrélogramme croisé annuel (Figure 6.3) montre un pic avec un décalage de 1 jour entre les venues en eaux et les venues en matières organiques du type humique avec des $r(k)$ respectifs de 0.55 et de 0.5. Contrairement au débit, l'effet mémoire des venues des matières organiques

est faible avec 6 jours contre 12 jours. Afin d'affiner le résultat, nous avons analysé plus en détail trois périodes hydrogéologiques typiques (été, automne et hiver) avec un pas de temps de 6 heures.

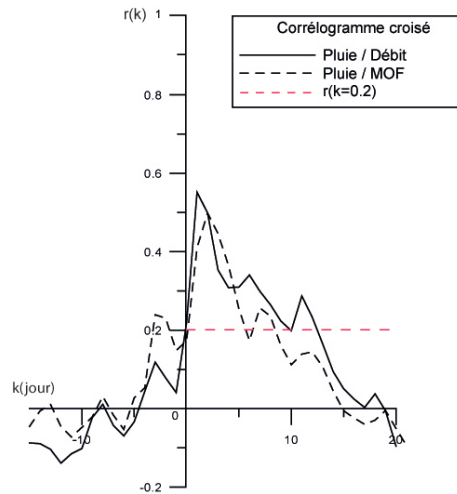


FIGURE 6.3 – Correlogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Roche Saint Alban

L'analyse corrélatoire croisée a été réalisée sur une durée de 15 jours pendant les périodes de basses eaux d'été, de moyennes eaux d'hiver et de hautes eaux de printemps. Les trois graphiques (Figure 6.4) présentent les résultats les plus significatifs de l'ensemble des correlogrammes croisés réalisés pour chaque période. Le pas de temps de 6 heures permet d'améliorer la résolution temporelle des délais. Le temps de réponse du maximum des corrélations change pour chaque période, et pour chaque relation pluie/débit et pluie/matière organique fluorescente. Un retard de 1.5 jours est observé entre les débits et la matière organique fluorescente pendant les périodes d'automne et d'été (Figure 6.4 a et b). Ce phénomène n'est pas retrouvé pour la période des hautes eaux où le débit et la matière organique fluorescente du type humique ont une relation avec les pluies très similaires, que ce soit au niveau qualité, du délai ainsi que de l'effet mémoire (Figure 6.4 c).

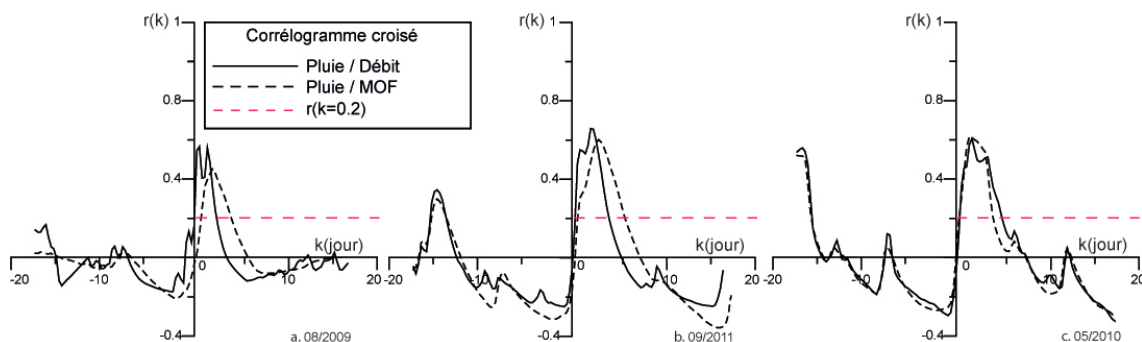


FIGURE 6.4 – Correlogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) basses eaux, (b) moyennes eaux et (c) hautes eaux pour le système karstique de La Roche Saint Alban

L'analyse corrélatoire croisée montre que les matières organiques fluorescentes de type humique arrivent avec le même délais (2.5 jours environ) alors que les venues en eau varient en fonction des saisons. La non stationnarité du transfert des matières organiques fluorescentes par rapport aux débits peut être expliquée soit par un changement de ratio entre l'infiltration et le ruissellement (effet de dilution) soit par un délai induit pour le transfert de la matière organique fluorescente provenant du sol. Les deux raisons peuvent se produire et s'associer pour expliquer ces changements. L'absence de délai entre la réponse du débit et de la matière organique fluorescente suite aux précipitations pourrait s'expliquer par une haute humidité du sol. Les pluies entraîneraient directement un transfert de la matière organique fluorescente du type humique.

Les mesures en continu de la matière de type humique à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban mettent en évidence un transfert en relation avec les débits (Figure 6.5). De manière générale, l'intensité de fluorescence augmente avec le débit. Bien que les venues des matières organiques du type humique soient indépendantes des débits, nous observons une baisse du ratio matières organiques/débits des basses aux hautes eaux. La relation entre les deux paramètres permet d'identifier trois périodes qui correspondent à un état de saturation du système karstique. La première période, été/automne (en gris clair sur la figure 6.5), correspond aux basses eaux. Pendant cette période, le taux d'export de matières organiques est très important et atteint un plateau de valeur maximale de $5 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹ équivalent Quinine Sulfate pour une moyenne de $2.5 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹. La seconde période, hiver/printemps (en noir sur la figure 6.5) caractérise les hautes eaux où le ratio entre matières organiques et débits est moins important. Deux raisons peuvent expliquer cette baisse de ratio, soit il y a peu de matières organiques transportées, soit il existe des phénomènes de dilution. Les valeurs sont de l'ordre de $4.2 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹ pour une moyenne de $2 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹. Entre les deux périodes se situe une zone transitionnelle (en gris foncé sur la figure 6.5) exposant des valeurs de transport de matière organique intermédiaire.

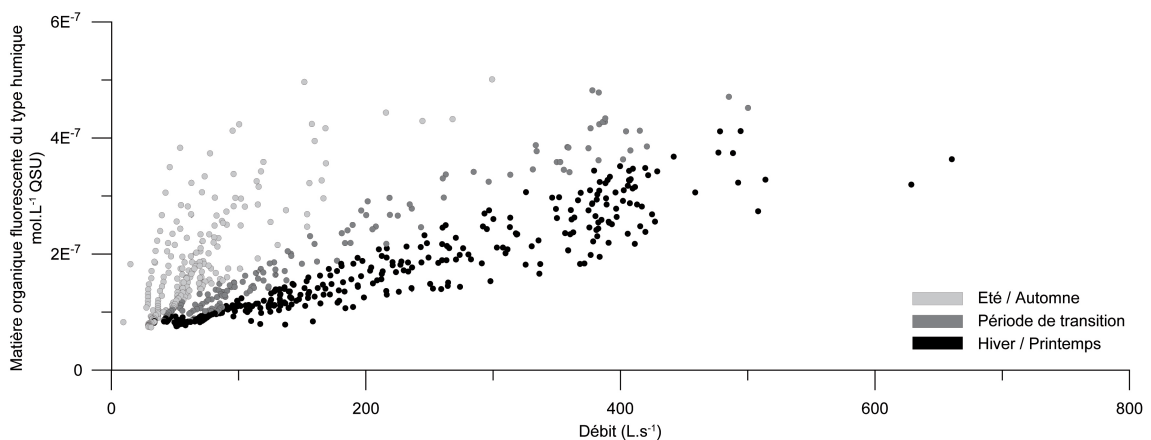


FIGURE 6.5 – Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Roche Saint Alban

b. La Combe

Un suivi similaire à celui de La Roche Saint Alban a été réalisé à l'émergence du système karstique de La Combe. L'analyse du corrélogramme croisé annuel des pluies/débit et des pluies/matières organiques fluorescentes est présentée figure 6.6. Nous observons sur le graphique qu'au bout d'un jour, un pic de venues en eaux apparait avec un $r(k)$ d'environ 0.6. Le pic de transfert de la matière organique est atteint au bout de deux jours avec un $r(k)$ de 0.4 qui semble stagner pendant 5 jours. Cette dernière observation peut avoir pour cause l'emplacement du fluorimètre de terrain dans le bac de décantation. L'effet mémoire des transferts est de 11 jours pour les matières organiques et de 8 jours pour les débits. Afin de vérifier si le plateau atteint par le transfert de la matière organique a pour origine un mauvais positionnement du fluorimètre de terrain, nous avons étudié plus en détail deux périodes hydrologiques avec un pas de temps de 6 heures.

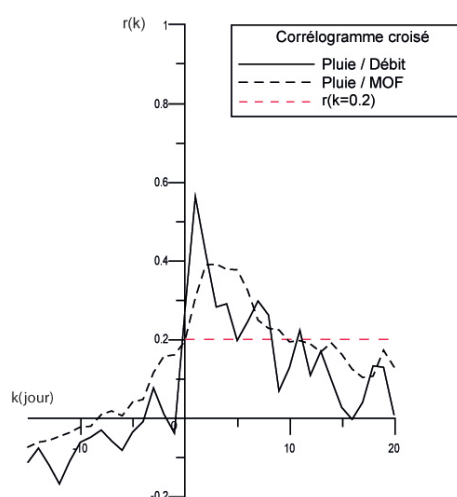


FIGURE 6.6 – Corrélogrammes croisés annuel pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés pour le système karstique de La Combe

L'analyse corrélatrice croisée a été réalisée sur une durée de 15 jours pendant l'hiver et le printemps. Les deux graphiques, représentés figure 6.7, sont les plus significatifs de toutes les analyses corrélatrices réalisées. Les corrélogrammes pluies/débits et pluies/matières organiques fluorescentes, réalisés sur une période de moyennes eaux au printemps (Figure 6.7 a), montrent un décalage de trois jours, les $r(k)$ respectifs sont de 0.7 et 0.35. L'effet mémoire des deux transferts est assez proche avec un $r(k=0.2)$ de 4.5 jours. Sur les analyses réalisées lors de la période des hautes eaux en hiver (Figure 6.7 b), les deux courbes se juxtaposent. Le $r(k)$ est de 0.75 et l'effet mémoire est de 5 jours.

Comme observées à la source de La Roche Saint Alban, en fonction des périodes hydrologiques, les analyses des corrélogrammes croisés montrent des différences. Ils confirment que les venues de matières organiques à l'intérieur du karst ne sont pas en relation directe avec le débit. Ceci peut s'expliquer par un changement dans la nature de la matière organique au cours des saisons, et/ou des niveaux de dilution plus ou moins importants au cours des cycles hydrologiques. L'effet du bac de décantation du captage ne semble pas influencer les analyses pour les deux périodes étudiées.

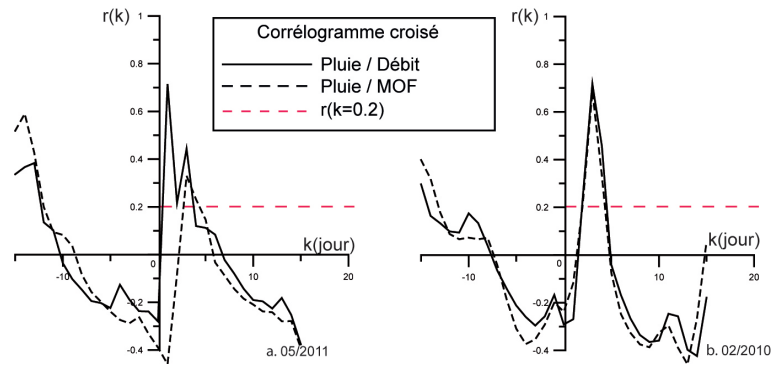


FIGURE 6.7 – Correlogrammes croisés pluie/débit et pluie/matières organiques fluorescentes (MOF) réalisés en (a) Mai 2011 et (b) février 2010 pour le système karstique de La Combe

Les mesures en continu de la matière organique du type humique à l'émergence en relation avec le débit (Figure 6.8) ne permettent pas d'identifier des tendances au cours des cycles hydrologiques contrairement à la source de La Roche Saint Alban. Ceci est en partie causé par différents problèmes rencontrés avec le fluorimètre de terrain (batterie se déchargeant trop vite ou encore défaut d'interrupteur). De plus, au cours de l'étude, le fluorimètre de terrain a été déplacé sur le site de Fontaine Noire, entraînant une lacune importante de données (3 mois) sur la période de basses eaux. Le manque de données sur la période Août-Novembre 2009, et les nombreuses lacunes sur la période 2010 - 2011, ne permettent pas de confirmer un comportement saisonnier sur le site d'étude.

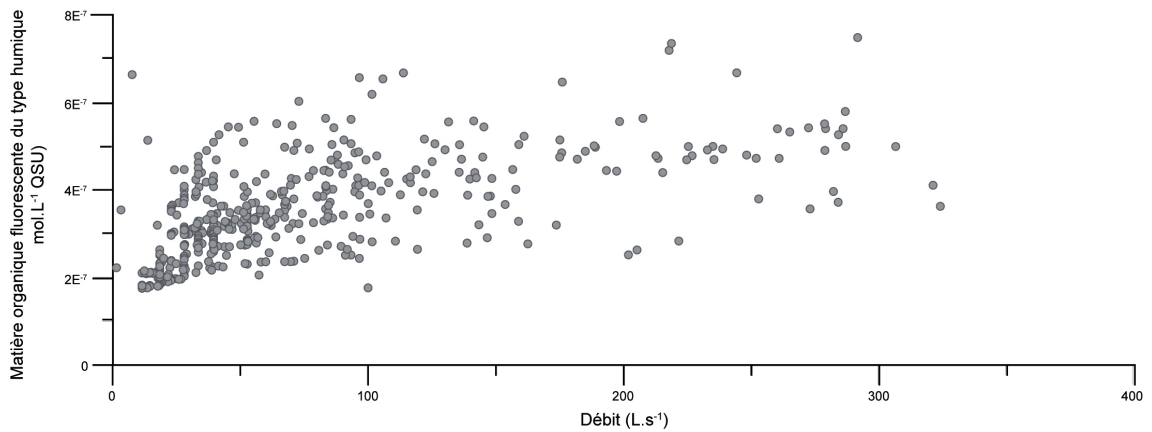


FIGURE 6.8 – Relation entre l'intensité de fluorescence des matières organiques fluorescentes du type humique en fonction du débit pour le système karstique de La Combe

En résumé, des tendances similaires sont visibles sur les deux systèmes karstiques. Le transfert de la matière organique fluorescente de type humique se fait de façon différente selon la période de l'année. En période de basses eaux, les transports sont plus importants (par rapport au débit) alors qu'en période de hautes eaux (sous couvert neigeux) le rapport matière organique/débit est plus faible. Il y a donc des phénomènes de dilution et/ou des changements de nature de la matière organique fluorescente.

1.2.3 Relation matières organiques fluorescentes - turbidité

a. La Roche Saint Alban

Nous avons cherché à identifier la composition de la turbidité, constituée de matières minérales et/ou organiques, à l'aide de courbes d'hystérésis représentant la turbidité en fonction de la matière organique (Figure 6.9). La première courbe d'hystérésis (en noir figure 6.9) correspond à la double crue d'Aout 2009 survenue en période de basses eaux. Nous observons une petite montée très rapide de la turbidité (de 1 à 2.5 NTU) tandis que les valeurs de matières organiques n'augmentent que très faiblement (de 1.1 à 1.2 u.a.). La composition de la turbidité est donc essentiellement d'origine minérale issue vraisemblablement d'effets de piston ou de chasse au sein du système. Les valeurs de turbidité continuent à augmenter pour ensuite atteindre une valeur maximale (15 NTU) alors que les valeurs en matières organiques fluorescentes restent faibles (3.5 u.a.). Cette période montre une turbidité encore essentiellement composée par des matières minérales. Les eaux suivies à la source proviennent soit de l'endokarst soit de la surface en ne transportant que très peu de matières organiques. La turbidité montre ensuite un palier alors que l'intensité des matières organiques augmente de façon importante (de 2.5 à 8.5 u.a.). La turbidité est donc caractérisée majoritairement par des matières organiques provenant de la surface. Sur cette période, nous observons une seconde augmentation très rapide de la turbidité (15 NTU) correspondant à la deuxième crue et caractérisée par un apport majoritairement minéral. Enfin, les teneurs en turbidité et en matière organique fluorescente décroissent de façon linéaire, il n'y a plus d'influence de la pluie, le karst se vide. L'analyse de la courbe d'hystérésis montre qu'au cours de cette double crue, il y a eu une reprise endokarstique puis une venue exokarstique des matières minérales et organiques.

La courbe d'hystérésis réalisée sur la période printanière 2010 (en rouge figure 6.9) montre un comportement différent dans la composition de la turbidité. Nous observons une petite montée de la turbidité sans variation de la matière organique. La turbidité est donc essentiellement composée de matière minérale provenant d'un effet de chasse ou de piston. La turbidité et la conductivité augmentent ensuite de façon linéaire (de 1 à 15 NTU pour la turbidité et de 2 à 8 u.a. pour la matière organique). La turbidité est donc soit composée d'autant de matière minérale que de matière organique, soit majoritairement de matières organiques. Toutefois, la baisse des valeurs de turbidité (de 15 à 2.7 NTU) alors que les valeurs de matière organique ne changent pas tend à dire que la turbidité était composée sur la montée en majorité par de la matière minérale. Cet apport cesse peu après au détriment de la matière organique. Enfin, la décroissance des valeurs de turbidité et de matière organique s'effectue toujours d'une façon linéaire, caractérisant la vidange du système karstique.

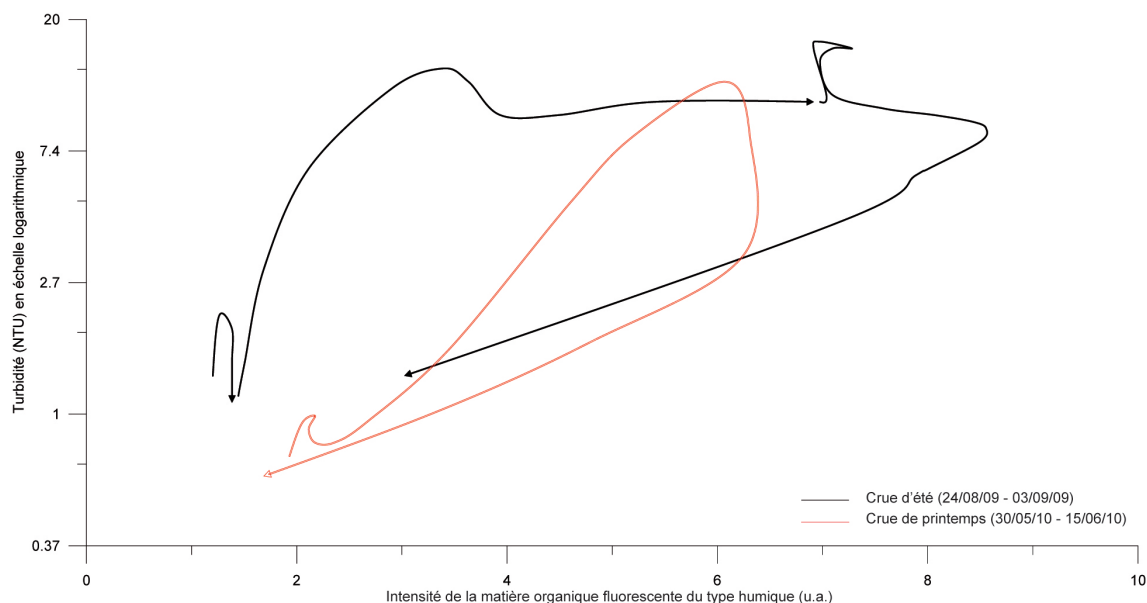


FIGURE 6.9 – Courbes d’hystérésis de la turbidité en fonction de l’intensité de fluorescence de la matière organique du type humique sur 2 périodes hydrologiques : en basses eaux (noir) et en moyennes eaux (rouge) sur le système karstique de La Roche Saint Alban

Pour poursuivre l’étude des courbes d’hystérésis de la turbidité en fonction de la matière organique fluorescente, nous avons caractérisé de façon qualitative, la composition des matières en suspension. Pour cela, nous avons prélevé des échantillons de 40 L d’eau à l’émergence du site de La Roche Saint Alban en période de crue. Après filtration à $0.45\ \mu\text{m}$, nous avons en moyenne $0.02\ \text{mg}$ de matière. Les eaux de la source de La Roche Saint Alban comportent donc peu de matières en suspension. Toutefois, les quantités ont été suffisantes pour être analysées à l’infrarouge (Figure 6.10). L’interprétation des spectres infrarouges montre que les sédiments recueillis peuvent être réunis en trois groupes.

Le premier groupe représente un type de sédiment riche en carbonate, matière organique et silice mais pauvre en argile. Ce sédiment caractérise la crue du 18/01/2010 qui présente une faible valeur de turbidité ($0.98\ \text{NTU}$).

Le deuxième présente une composition plus pauvre en carbonate que la première catégorie mais assez riche en matière organique, en argile et en silice. Ce type de sédiment est plus important, il est retrouvé lors des crues du 03/11/2009 ($3.35\ \text{NTU}$), du 04/11/2009 ($4.27\ \text{NTU}$), du 08/12/2009 ($1.27\ \text{NTU}$), du 05/02/2010 ($0.72\ \text{NTU}$), du 01/04/2010 ($0.9\ \text{NTU}$) et du 06/11/2010 ($0.74\ \text{NTU}$).

Le dernier groupe est défini par des sédiments plutôt pauvres en carbonate et en matière organique mais riche en silice et en argile. Il est identifié sur trois crues, ayant eu lieu les 26/02/2010 ($1.15\ \text{NTU}$), 03/05/2010 ($2.13\ \text{NTU}$) et le 08/06/2011 ($1.41\ \text{NTU}$).

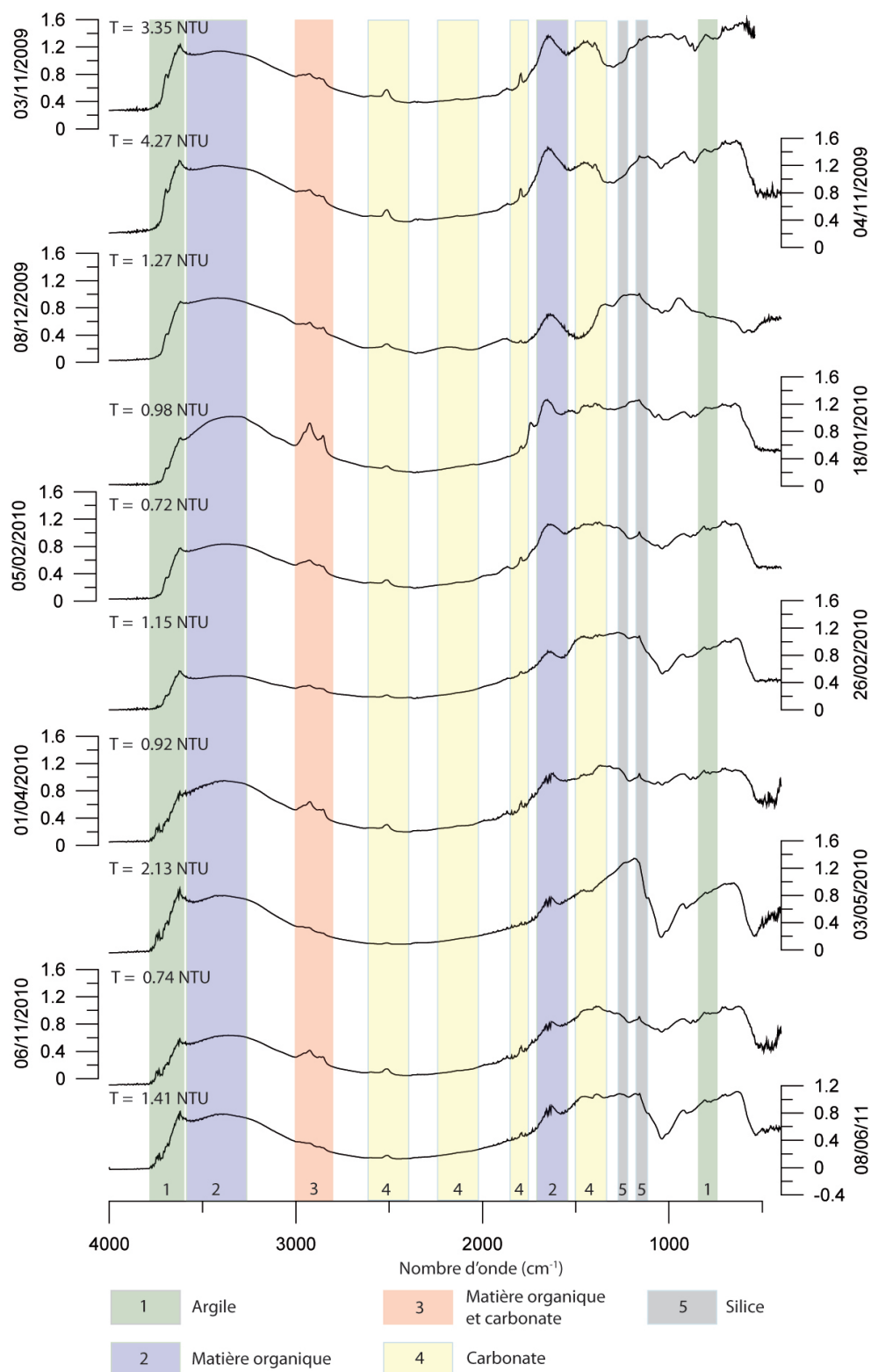


FIGURE 6.10 – Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Roche Saint Alban

La composition des matières en suspension n'est donc pas homogène. Il n'existe pas de relation marquée entre la valeur de turbidité et sa composition. Toutefois, les deux premiers groupes de sédiments arborent le même spectre que ceux des horizons de surface obtenus lors de l'analyse des sols (Chapitre 4). Ils pourraient caractériser des apports de matière exokarstique. Le dernier groupe présente majoritairement de la silice et des argiles, et peu de matière organique et de carbonate. Il pourrait définir des apports de matière endokarstique.

Pour déterminer l'origine des matières en suspension et dissoutes lors d'une crue, nous avons couplé les mesures en continu de fluorescence à la turbidité [Tissier *et al.* 2011b]. La turbidité est un indicateur général, elle caractérise des venues des matières d'origine endo et exokarstiques tandis que la matière du type humique est un indicateur d'arrivée d'eau de surface ayant traversée le sol. Le rapport des deux paramètres turbidité sur matières organiques fluorescentes peut permettre de discriminer les origines des matières composant la turbidité. En prenant l'exemple de la crue double du mois d'août 2009 (Figure 6.11), nous observons deux pics de turbidité (Figure 6.11 a), le premier de 13 NTU arrive à la fin de la première crue et le second, plus important de 17 NTU est atteint en début de la seconde crue. La matière organique du type humique arrive vers la fin du premier pic de crue puis devient plus importante avec la seconde venue en eau. En comparant la turbidité avec les mesures d'intensité des matières du type humique, nous pouvons observer que le rapport Turbidité sur Fluorescence (T/F sur la figure 6.11 b) est plus important lors de la première venue en eau. Ceci nous permet de faire comme première hypothèse que les arrivées de matières sont d'origine endokarstique pour la première crue. Pour la seconde crue, bien que la turbidité mesurée soit plus importante le rapport T/F est beaucoup plus faible. Cette observation nous permet de formuler comme deuxième hypothèse que l'origine des matières transportées est exokarstique. Cette arrivée de matières organiques de type humique peut être, par ailleurs, atténuée par un effet de filtre interne lié à la turbidité de l'eau (diffusion de l'excitation et de l'émission atténuant le signal réel).

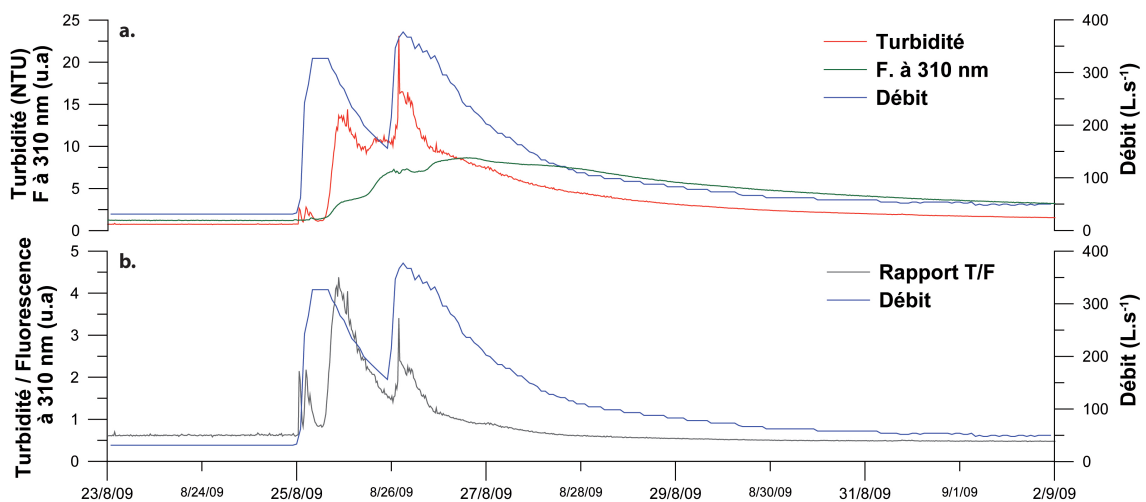


FIGURE 6.11 – Etude des arrivées des matières organiques du type humique et des matières en suspension (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (T/F) (b) lors d'une crue d'été sur le système karstique de La Roche Saint Alban

b. La Combe

Comme pour le site de La Roche Saint Alban, nous avons regardé la composition de la turbidité à partir d'une courbe d'hystérésis représentant la turbidité en fonction de la matière organique fluorescente (Figure 6.12). Pour cela, nous avons analysé une double crue s'étant produite sur le site de La Combe du 01/09 au 06/10/11. La première partie de la courbe montre une augmentation importante des valeurs de turbidité alors que la teneur en matière organique n'évolue que très légèrement. Ceci montre que la composition de la turbidité est principalement minérale d'origine endokarstique. Suite à cette montée de la turbidité, les matières fluorescentes augmentent alors que les valeurs de turbidité se stabilisent aux alentours des 7 NTU. La composition de la turbidité est donc plus organique provoquée par une influence des venues exokarstiques. La seconde crue se caractérise par une montée importante de la turbidité avec une légère augmentation des matières organiques. Une arrivée de matières minérales permet d'expliquer cette augmentation soudaine. Puis, les matières fluorescentes augmentent tandis que les teneurs de turbidité se stabilisent de nouveau, la turbidité est maintenant caractérisée par des matières organiques. Enfin, les valeurs de turbidité décroissent bien que les teneurs en matière organique restent à leur plus haut niveau (6.5 u.a.). Sur cette période, les venues de matière organique restent constantes alors que l'apport de matières minérales baissent. La courbe d'hystérésis s'achève avec une décroissance très rapide des matières organiques alors que la turbidité est déjà basse (2 NTU), le karst se vidange. La seconde crue est donc caractérisée par des venues exokarstiques plus importantes que pour la première avec une contribution non négligeable de l'endokarst.

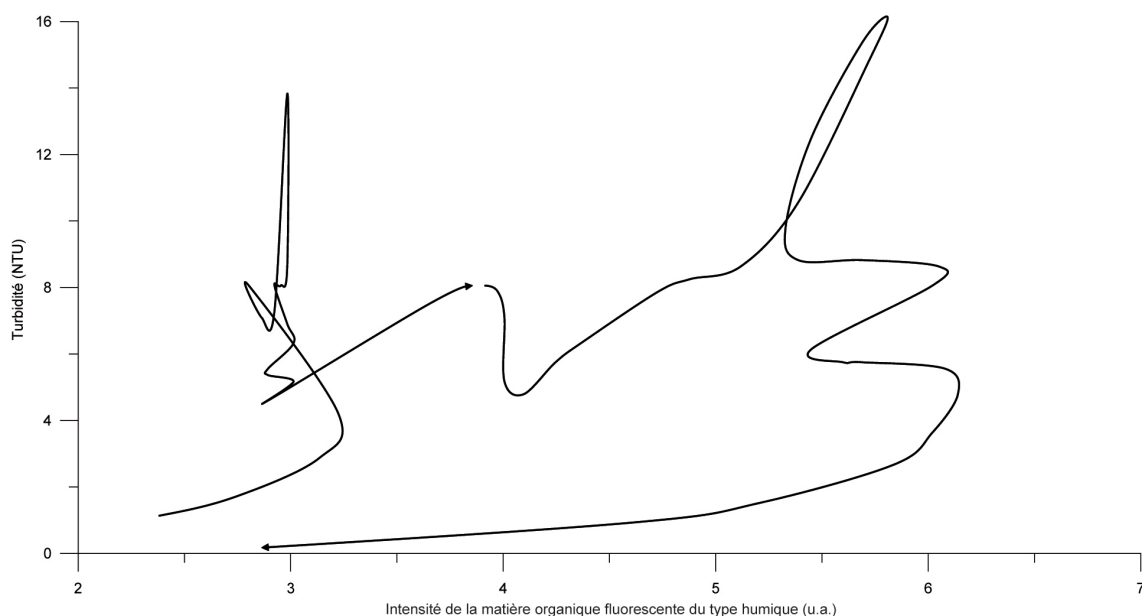


FIGURE 6.12 – Courbe d'hystérésis de la turbidité en fonction de l'intensité de fluorescence de la matière organique du type humique en automne 2011 sur le système karstique de La Combe

Les conditions de prélèvement des matières en suspension ont été identiques à celles du site de La Roche Saint Alban. Ainsi, sur le captage de La Combe les 40 L d'eau ont permis d'obtenir en moyenne 0.03 mg. Les quantités étant suffisantes, nous avons pu réaliser des analyses infrarouges sur les matières en suspensions (Figure 6.13). Comme pour l'étude du site de La Roche Saint Alban, les échantillons peuvent être regroupés en trois catégories.

La première représente un type de sédiment riche en carbonate, en matière organique et en silice, cependant le sédiment est pauvre en argile. Ce sédiment caractérise la crue du 18/01/2010, la valeur de turbidité est de 1.68 NTU.

Le deuxième type de sédiment est composé de peu de carbonate mais présente en majorité des matières organiques, des argiles et de la silice. C'est le type de sédiment le plus représenté. Il apparaît au cours des crues du 18/11/2009 (0.99 NTU), du 08/12/2009 (3.44 NTU), du 18/02/2010 (0.82 NTU) et du 03/05/2011 (0.23 NTU).

Le dernier groupe de sédiments ne comporte que peu de carbonates et de matières organiques mais il est riche en silice et en argile. Il est identifié les 26/02/2010 (3.31 NTU), 11/06/2010, et le 04/12/2011 (0.65 NTU).

L'analyse des sédiments de La Combe présente les mêmes résultats obtenus à La Roche Saint Alban. Il n'existe pas à première vue de relation entre les valeurs de la turbidité et sa composition. De plus, les deux premiers groupes de sédiments ont un signal identique à ceux des horizons de surface caractérisant vraisemblablement des apports de matière exokarstique. Le dernier groupe composé majoritairement de la silice et des argiles pourrait définir des apports de matière endokarstique.

De plus, les dates de présence des catégories de sédiments concordent avec celles de La Roche Saint Alban. Ce résultat vient conforter l'idée que la composition des sédiments seraient en accord avec des transferts saisonniers. Pour rappel, la première catégorie est présente le 18/01/2010. Le deuxième type de sédiment apparaît majoritairement sur la période Novembre - mi Février, période de hautes eaux. La dernière catégorie est un peu plus répartie dans le temps, mais elle semble définir des crues apparaissant après une période d'étiage, donc une période de basses eaux.

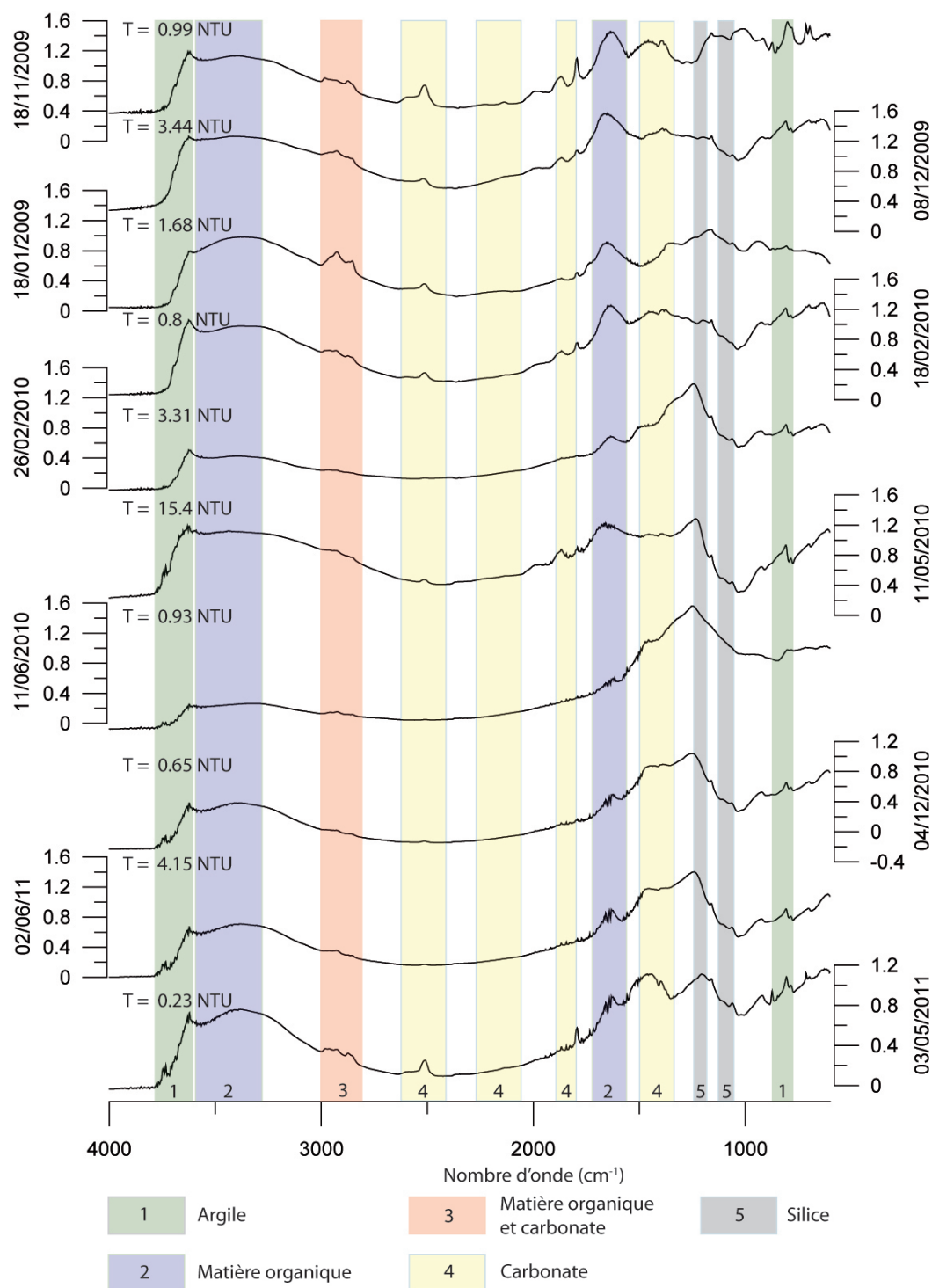


FIGURE 6.13 – Analyses infrarouges des sédiments de la source de La Combe

Le rapport turbidité sur fluorescence T/F a été également étudié sur le site de La Combe afin de vérifier si la méthode est applicable et reproductible sur un autre système karstique. Nous avons choisi deux crues très proches dans le temps et faisant suite à une période sèche durant les mois de Septembre-Octobre 2011. La figure 6.14.a montre que la turbidité arrive peu après le pic de crue et atteint les 13 NTU. Un deuxième pic de turbidité le précède avec une valeur plus faible de 7 NTU. Lors de la seconde crue, la turbidité se présente de façon synchrone avec le débit avec un pic de 16 NTU, donc plus important que le premier pic, puis il est suivi d'un second pic, plus petit, de 9 NTU. La matière organique du type humique montre une légère augmentation de 3 à 4 u.a. lors de la première crue, puis atteint les 6 u.a. lors de la seconde crue. Elle présente un petit pic synchrone au pic de crue et est suivie d'une légère augmentation lors de la récession. Le rapport T/F (Figure 6.14.b) montre que lors de la première crue, l'origine des matières est essentiellement endokarstique. Le second petit pic de la première venue en eau s'estompe, les matières ont donc toujours une origine endokarstique mais sont mélangées avec des venues exokarstiques. Pendant la seconde crue, il apparaît que le rapport T/F est plus faible que pour la première crue. Il y a donc eu un lessivage exokarstique bien qu'il reste du matériel mobilisable à l'intérieur du système karstique. Les origines des matières en suspension sont donc double, endo et exokarstique, avec une dominante exokarstique.

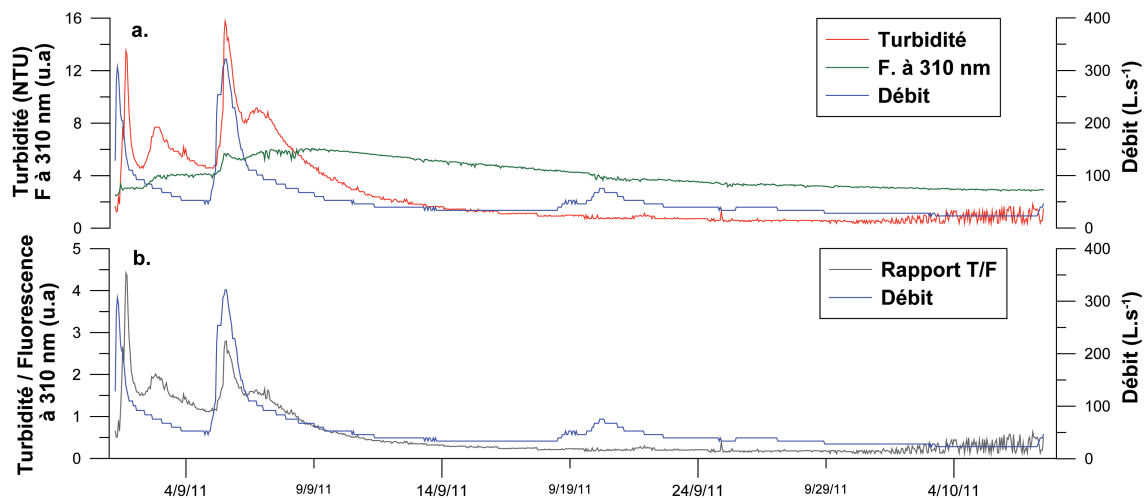


FIGURE 6.14 – Etude des arrivées de matières organiques du type humique et de MES (a) évolution du rapport turbidité sur fluorescence (b) lors d'une crue d'automne sur le système karstique de La Combe

1.2.4 Relation matières organiques fluorescentes - carbone organique total

De nombreux travaux ont montré que la matière organique fluorescente était bien corrélée avec le carbone organique total dans les eaux de surface [Ferrari *et al.* 1996 ; Cumberland et Baker 2007 ; Spencer *et al.* 2007]. Le fluorimètre de terrain a été proposé comme un outil pour suivre en continu le COT [Savoy 2007 ; Pronk *et al.* 2007 ; Charlier *et al.* 2010]. La relation entre la matière organique fluorescente du type humique avec le COT obtenu par analyse manuelle a été étudiée (Figure 6.15) sur le site de La Roche Saint Alban. Bien qu'aucune relation n'est observable

sur toute la période, trois relations significatives entre les deux paramètres ont été identifiées en fonction de chaque période hydrologique. Pour les périodes de hautes eaux ($R^2=0.92$, $N=25$) et de moyennes eaux ($R^2=0.95$, $N=26$), la matière organique fluorescente de type humique est un bon indicateur du COT. Les pentes des régressions linéaires sont respectivement égales à $6.7 \cdot 10^6$ et $1.4 \cdot 10^7$. De plus, les régressions linéaires sont très proche de l'origine, ce qui signifie que la quasi totalité du COT est fluorescente. Pendant la période de basses eaux, la corrélation entre les deux paramètres est moins significative ($R^2=0.52$, $N=21$). La pente de la régression linéaire ($1.1 \cdot 10^7$) est semblable à celle obtenue en période de moyennes eaux. L'intersection avec l'axe des ordonnées ne passe pas par l'origine mais la régression linéaire coupe l'axe à 1.76 mg.L^{-1} de COT. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une partie du COT n'est pas fluorescente. Les différences de pente pourraient être dues à un changement dans la qualité de la matière organique fluorescente. La plus faible pente durant les hautes eaux montre une meilleure efficacité de la fluorescence par rapport aux périodes de basses et moyennes eaux. Ceci pourrait être du aussi bien par une modification du temps de transfert induit par un changement biotique ou abiotique des microorganismes, ou par une variation de la source de matières organiques provenant d'horizon plus profond (plus aromatique). Quelque soit l'origine du changement, ces relations spécifiques peuvent être utilisées pour obtenir un bon suivi du COT par la mesure de la fluorescence de la matière organique.

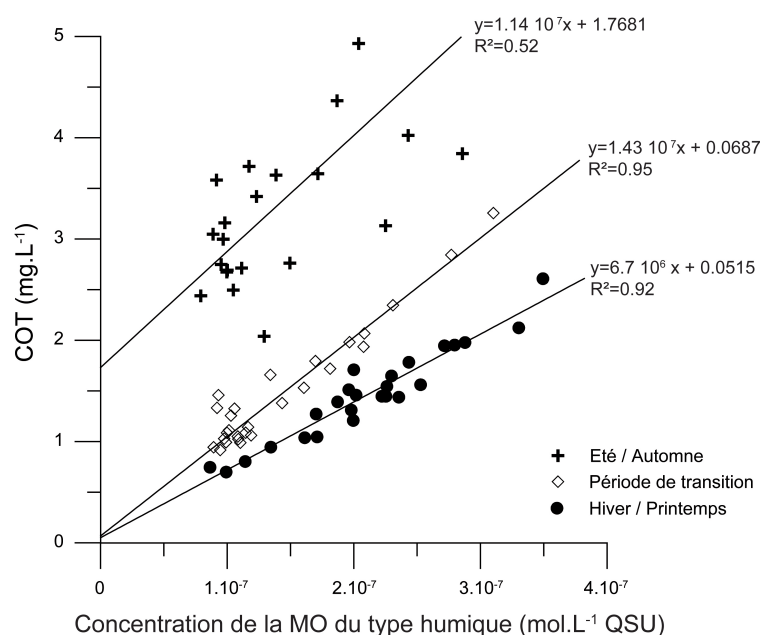


FIGURE 6.15 – Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matières organiques fluorescentes du type humique pour le système karstique de La Roche Saint Alban

La relation COT en fonction de la matière organique fluorescente du type humique a été étudiée pour le site de La Combe (Figure 6.16) afin de corroborer les résultats observés sur le système de La Roche Saint Alban. Nous pouvons observer que la majorité des points ($N=40$) s'alignent sur une droite d'équation $y = 6.69 \cdot 10^6x + 0.19$ possédant un coefficient de corrélation $R^2=0.91$. Toutefois, 14 points (les croix sur la figure 6.16) ne montrent pas de relation particulière entre eux. Ces points

dispersés sont aussi observés sur les sites de Fontaine Noire et de Fontaine Froide, et principalement pendant les périodes de basses eaux. Au cours de ces périodes, la matière organique fluorescente du type humique présente vraisemblablement un changement dans sa nature. De ce fait, toutes les matières organiques du type humique ne fluorescent pas. Ces résultats montrent, comme observés sur le site de La Roche Saint Alban, que la relation COT/matières organiques fluorescentes varie au cours des cycles hydrologiques et qu'il paraît peu envisageable de suivre le COT tout au long de l'année hydrologique avec la même relation. Pour déterminer les autres relations potentielles entre le COT et la matière organique fluorescente du type humique, un suivi plus complet doit être réalisé sur le site de La Combe.

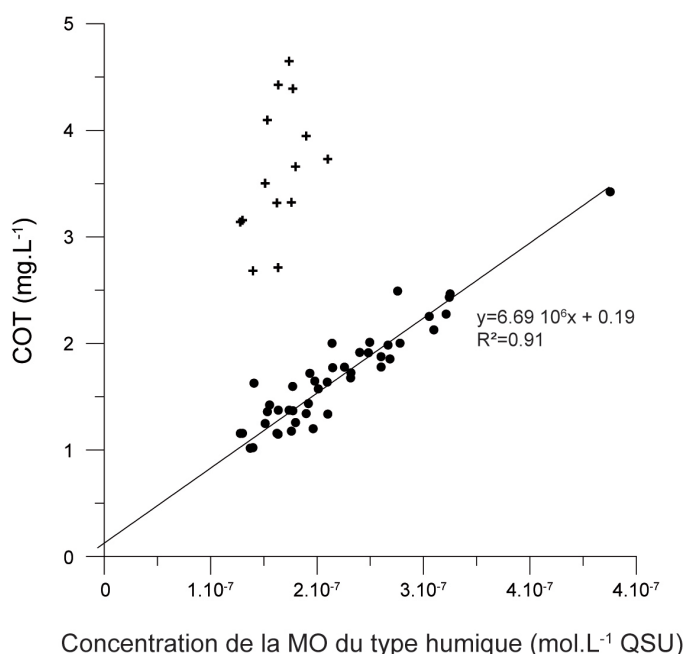


FIGURE 6.16 – Etude des relations entre le carbone organique total (COT) et la concentration de matière organique fluorescente du type humique pour le système karstique de La Combe

Reconstitution du flux de COT

La relation entre la matière organique fluorescente et le COT a été utilisée pour estimer le flux de carbone organique en fonction des trois périodes hydrologiques. Le résultat est présenté figure 6.17. Le flux moyen annuel est d'environ 15 kg/ha/y, ce résultat est en accord avec les valeurs déterminées dans les eaux de surface forestières [Clair and Ehrman 1996, Sarkkola *et al.* 2009]. Quelque soit la période, les pluies sont suivies par des venues en eaux chargées en carbone organique. Le flux de carbone maximum est identifié pendant la période où le karst possède un niveau d'eau moyen, cette période correspond à la recharge du sol en matière organique fraîche suite liée à la sénescence des feuilles.

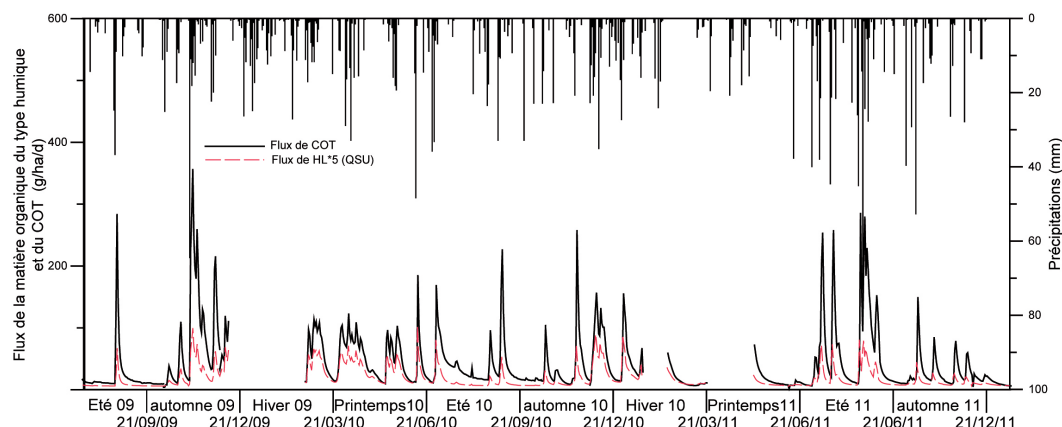


FIGURE 6.17 – Reconstitution de la chronique du flux de carbone organique total en fonction du cycle hydrologique sur le système karstique de La Roche Saint Alban

1.2.5 Suivi des matières organiques au cours d'une crue

Nous avons suivi sur une même période deux crues à un pas de temps très réduit afin d'observer le comportement des venues en matières organiques et la présence des bactéries fécales et revivifiables. Pour cela, nous avons installé un préleveur automatique à l'exutoire des sources de La Roche Saint Alban et de La Combe pour échantillonner les eaux à un pas de temps de 6 heures. Les résultats sont présentés figure 6.18.

L'analyse de la crue de la source karstique de La Roche Saint Alban (Figure 6.18a.) montre que la turbidité présente deux pics de 1.1 NTU. Le premier en tout début de crue, ayant probablement une origine endokarstique, et le deuxième apparaissant avec le début de la décrue pouvant marquer une origine exokarstique. Le nombre de bactéries est très important lors du second pic de turbidité (45 E. Coli et 20 bactéries revivifiables et Entérocoques) et, pour l'ensemble des espèces le nombre décroît avec la récession (30 E. Coli et 10 bactéries revivifiables et Entérocoques). La proportion des bactéries présentes dans les eaux est en accord avec les teneurs de turbidité et des venues en matières organiques fluorescentes du type humique. Le COT et les matières organiques du type humique montrent un comportement similaire avec une augmentation assez synchrone pendant le second pic de turbidité. Les valeurs d'azote, ne présentent pas, ici, de variation significative. Enfin les matières organiques du type protéique ont un pic important lors du second pic de turbidité, puis diminuent aussitôt pour réaugmenter légèrement après. Il est difficile pour cet événement pluvieux de comprendre le comportement et l'origine des matières organiques du type protéique.

La crue de La Combe (Figure 6.18b.) est un peu plus difficile à analyser que celle de La Roche Saint Alban. Certains points ont été supprimés suite à un mauvais rinçage des flacons du préleveur automatique rendant les échantillons inexploitable. La crue se présente en deux venues. La première très légère est marquée par un palier à 40 L.s^{-1} , alors que la seconde venue en eau atteint un débit maximum de 140 L.s^{-1} . La première venue n'est pas turbide, les valeurs restent proches des valeurs de base, cependant la seconde venue en eau apporte des matières en suspension (3 NTU)

mais présentent un décalage avec le pic de crue. Le nombre de bactérie suit bien l'allure de la courbe de turbidité et des matières organiques fluorescentes du type humique. Le COT et les matières organiques du type humique augmentent aussi avec l'arrivée du second pic de turbidité. Les valeurs de COT sont maximales au début du pic de crue (7.5 mg.L^{-1}) puis diminuent le reste de la crue. Les matières organiques du type humique présentent une bonne relation avec le débit. Toutefois lors de la récession, le suivi est marqué par une hausse des valeurs pouvant être imputée à la localisation du fluorimètre de terrain dans le bac de décantation. Les valeurs d'azote total ne varient pas de manière significative. Les matières organiques du type protéique ont une valeur importante avant le début de crue et chutent avec l'arrivée des premières eaux. Pendant la seconde venue, les valeurs remontent avant l'arrivée du second pic de turbidité puis diminuent avec la décrue pour encore une fois réaugmenter à la toute fin de la récession. Il semblerait que les matières organiques du type protéique seraient plus importantes en récession ou en période de basses eaux. Elles marqueraient un écoulement lent ou non dilué.

NB : nous ne présentons pas les matières organiques issues d'une production microbiologique (Figure 6.18) car l'analyse de ces matières a été impossible. Tous les échantillons de l'étude ont été analysés par un spectrofluorimètre différent, il possédait des fentes optiques plus grande que le Cary Eclipse Varian habituellement utilisé (10 nm au lieu de 5 nm). Les matières issues d'une production microbiologique n'ont donc pas pu être identifiées.

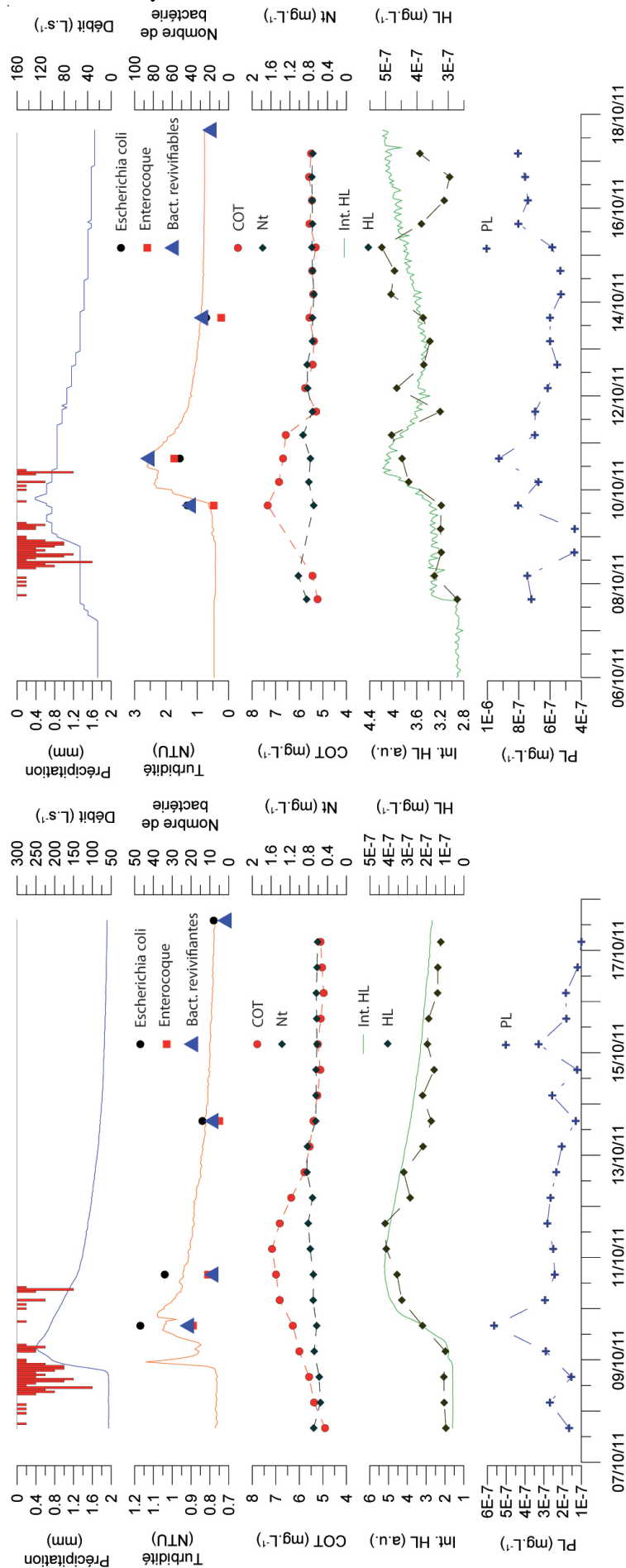


FIGURE 6.18 – Suivi de la turbidité, du nombre de bactéries, du COT, de Nt, et des matières organiques fluorescentes au cours d'une crue d'Octobre 2011 sur les sites de (a) La Roche Saint Alban et de (b) La Combe
Avec : *PL*=protéine like, *HL*=humique like, *Int. HL*=intensité des humiques mesuré par le fluorimètre de terrain, *COT*=Carbone Organique Total, *Nt*=Azote totale

2 Vulnérabilité spécifique anthropique : exemple de l'impact des activités forestières

2.1 Description et localisation des travaux sylvicoles sur les bassins d'alimentation d'étude

Description

Les travaux sylvicoles ont été de nature et d'intensité différente sur les systèmes karstiques étudiés, allant de la simple coupe de jardinage à la création d'une piste forestière. Leur localisation au sein des bassins d'alimentation ont été variables également. Ainsi, pour La Roche Saint Alban (Figure 6.19 A), les travaux ont eu essentiellement lieu dans le périmètre de protection éloigné. Pour le système de La combe (Figure 6.19 B), une coupe a été réalisée dans le périmètre de protection rapprochée. Enfin, les travaux effectués sur le système de Fontaine Noire (Figure 6.19 D) se sont établis dans le périmètre de protection rapprochée et immédiate. En coopération avec l'ONF, les travaux réalisés dans les bassins d'alimentation des systèmes karstiques ont pu être recensés (Tableau 6.2). La définition des termes sylvicoles utilisés est proposée en Annexe 5.

Tableau 6.2 – Types et caractéristiques des travaux réalisés sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques de La Roche Saint Alban (RSA), La Combe (LC) et Fontaine Noire (FN)

Site	Peuplement	Nature des travaux	Surface ou linéaire	Période	Technique forestière
RSA	Futaie irrégulière	Coupe Chablis		Nov-10	Débusquage/débardage par tracteur forestier
RSA	Futaie irrégulière	Piste forestière	710 m, 3700 m ³ terre 150 m ³ roche	Avr-10	Ouverture à la pelle mécanique et brise-roche (minage interdit)
RSA	Futaie irrégulière	Coupe d'emprise	0.75 ha	Avr-10	Débardage tracteur forestier à l'avancement de l'ouverture de piste
RSA	Taillis simple	Coupe rase	0.75 ha	Abat. Oct-09 Débar. Juil-09	Débusquage et débardage tracteur forestier depuis piste et voies forestières
RSA	Futaie jardinée	Coupe jardinage	14 ha	Sep-10	Debusquage/débardage par tracteur forestier
RSA	Futaie jardinée	Coupe jardinage	8 ha	Sep-10	Debusquage/débardage par tracteur forestier
RSA	Futaie irrégulière	C. futaie irrégulière	9 ha	Nov-10	Debusquage/débardage par tracteur forestier
RSA	Futaie irrégulière	C. futaie irrégulière	4 ha	Sep-10	Debusquage/débardage par tracteur forestier
RSA	Taillis simple	Coupe rase	1 ha	Mai-11	Debusquage/débardage par tracteur forestier
RSA	Futaie irrégulière	C. futaie irrégulière	14 ha	Abat. Oct-09 Débar. Mars-10	Debusquage/débardage par tracteur forestier
FN	Futaie irrégulière	C. futaie irrégulière	15 ha	Aout-10	Debusquage/débardage par tracteur forestier
LC	Futaie irrégulière	C. futaie irrégulière	5 ha	Juin-10	Débardage par tracteur forestier

Les travaux réalisés sur le site du Creux des Elaphes ont consisté en une coupe rase (Figure 6.19 C). Les activités se sont effectuées du 25 Mai au 1 Juin 2011. Nous n'avons pas pu obtenir des informations sur la surface et la nature des travaux. La végétation en surface correspond à une forêt mixte de hêtre et de sapin. A notre connaissance, il n'y a pas eu de travaux entrepris sur le bassin d'alimentation du

système karstique de Fontaine Froide. L'étude de la source permet d'avoir un référent pour valider le suivi des autres sites.



FIGURE 6.19 – Photographies présentant l'impact visuel des activités sylvicoles sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques (A) de La Roche Saint Alban, (B) de La Combe, (C) du Creux des Elaphes et (D) de Fontaine Noire

Localisation des travaux sur les cartes de vulnérabilité

Le positionnement des travaux sur le bassin d'alimentation des systèmes karstiques de La Roche Saint Alban, de La Combe et de Fontaine Noire est présenté figure 6.20. La carte de vulnérabilité choisie possède les pondérations suivantes : I_4 , R_2 , P_2 et K_2 (Cf Chapitre 5).

Le bassin d'alimentation du système karstique de La Roche Saint Alban est faiblement à moyennement vulnérable. Les nombreux travaux effectués sont dans des zones peu propices à une dégradation de la qualité de l'eau. La probabilité d'un impact suite aux activités sylvicoles est quasi nulle, hormis, peut être, si ces activités ont une intensité très importante (la création d'une piste par exemple).

CHAPITRE 6. VULNÉRABILITÉ SPÉCIFIQUE LIÉE À LA REMOBILISATION ANTHROPIQUE OU NATURELLE DES SOLS

Les travaux réalisés sur les systèmes de La Combe et de Fontaine Noire se situent dans des zones à vulnérabilité moyenne à forte. Il est fortement probable que les activités aient un impact sur la qualité des eaux des sources.

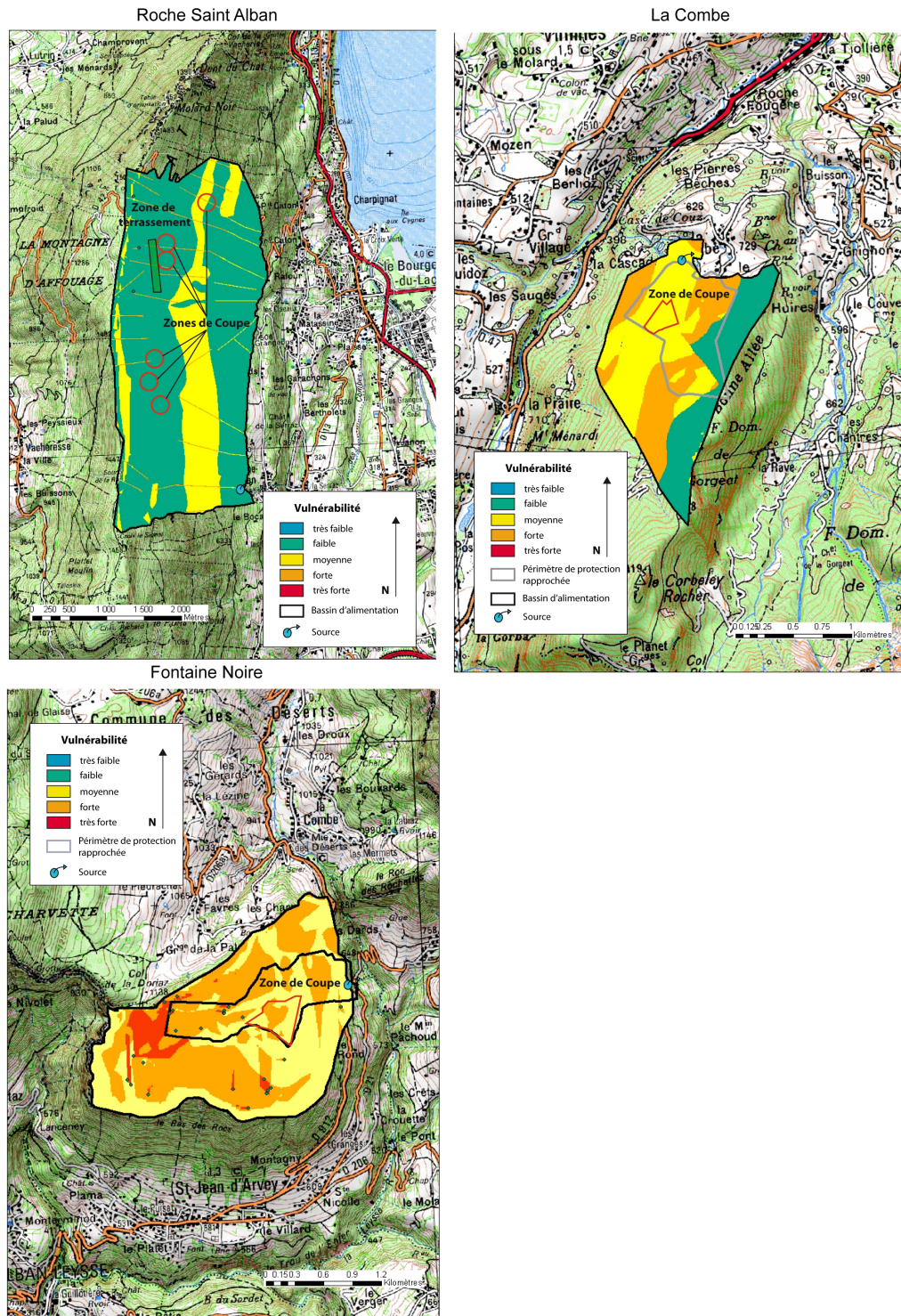


FIGURE 6.20 – Cartes de Vulnérabilité de La Roche Saint Alban, de La Combe et de Fontaine Noire réalisées à partir de la méthode PaPRIKa

2.2 Recherche d'impact des activités sylvicoles

2.2.1 Systèmes impactés

a. La Combe

Les travaux sur le bassin d'alimentation du système de La Combe ont consisté en une coupe de jardinage d'une futaie irrégulière, sur une zone de 5 hectares (Tableau 6.2). La coupe s'est effectuée du 1er au 30 Juin 2010 dans une zone de vulnérabilité moyenne (Figure 6.20). Les résultats des analyses réalisées sur la source ont montré des augmentations de plusieurs paramètres au cours des travaux (Tableau 6.3 et Figure 6.21). Les paramètres suivis pour l'étude de l'impact suite à une remobilisation du sol sont : la conductivité, la température, le COT, le Nt, la turbidité et les matières organiques fluorescentes.

Les mesures de turbidité, pendant les travaux (bande rouge Figure 6.21) présentent un pic important de 25 NTU, cette valeur n'avait jamais été atteinte auparavant. Les crues successives, à la suite des travaux, entraînent une turbidité importante dépassant à chaque fois les normes de potabilité, de plus ces pics paraissent durer plus longtemps. Il a été dit précédemment que chaque crue n'entraînait pas forcément des pics de turbidité. La coupe réalisée a donc provoqué une augmentation de la fréquence et de la durée des pics de turbidité. Pendant la période des travaux, les mesures de température et de conductivité ne montrent pas d'évolution significative. Toutefois les deux baisses de conductivité (330 à 290 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et de 330 à 310 $\mu\text{S.cm}^{-1}$) indiquent que les venues en eau ont une origine exokarstique.

Les relevés d'azote total présentent 2 jours après le début des travaux un pic important de 14.2 mg.L^{-1} , alors que les valeurs mesurées habituellement ne dépassent pas les 1 mg.L^{-1} . Nous pensons, toutefois, que le pic est trop précoce, il devrait apparaître plus tardivement. Deux hypothèses pourraient expliquer cette venue importante d'azote. Peu de temps avant les analyses, un agriculteur local a épandu du fumier sur un champ à proximité du captage. Néanmoins, le champ est plus en aval que la source et il n'a pas été observé de récurrence dans les hautes valeurs d'azote. La deuxième, la plus vraisemblable est que les travaux de sylviculture ont commencé bien avant le 1^{er} Juin 2010.

Les mesures du COT montrent des valeurs importantes durant la période des travaux. Elles passent d'une valeur moyenne de 2 mg.L^{-1} à 4.6 mg.L^{-1} . Cependant, ces augmentations sont retrouvées sur la même période 1 an plus tard, ainsi que sur les autres sites étudiés. Ce paramètre ne semble pas être un indicateur pertinent.

Des venues de matières organiques fluorescentes sont perceptibles 2 semaines après le début des travaux, lors de la première crue. Les valeurs du type humique présentent un seul pic qui dépasse les valeurs normales ($4.8 \cdot 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$ au lieu d'une moyenne à $2.5 \cdot 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$). Les mesures du type protéique montrent aussi un pic important. Il atteint les $1.1 \cdot 10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}$ alors qu'habituellement le seuil de $3.4 \cdot 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$ n'est jamais dépassé.

Le fluorophore caractérisant l'activité microbiologique apparaît de façon impor-

tante sur cette période, cependant il présente régulièrement des teneurs similaires. Il ne peut donc pas être défini comme indicateur des activités.

Les paramètres à retenir, comme indicateurs des activités sylvicoles, semblent être les matières organiques du type protéique et du type humique. Il faut, toutefois, les associer avec le TOC, le Nt et la turbidité pour valider l'impact de la sylviculture par la remobilisation du sol et la dégradation des rémanents.

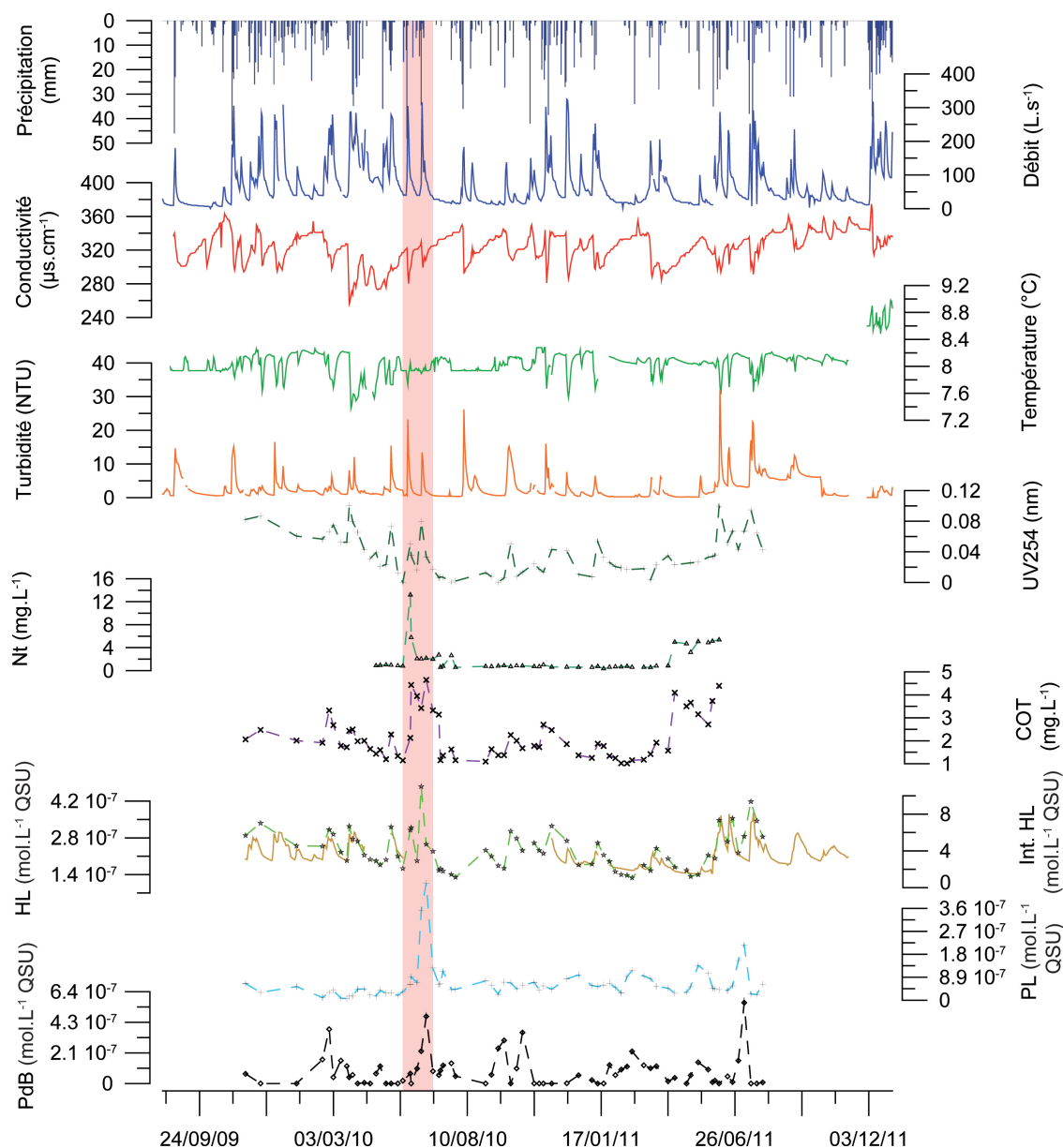


FIGURE 6.21 – Chronique de l'impact des travaux de sylviculture du site de La Combe (La bande rouge représente la durée des travaux)

Tableau 6.3 – Valeur des paramètres suivis avant et après les travaux de sylviculture sur le bassin d'alimentation de La Combe

Paramètres	Avant les travaux (n=19)			Pendant les travaux (n=6)			Après les travaux (n=45)		
	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moyenne</i>
Turbidité <i>mg.L⁻¹</i>	0.57	23.19	2.64	0.7	13.46	3	0.04	31.9	3
COT <i>mg.L⁻¹</i>	1.14	3.32	1.97	2.12	4.65	3.64	1.016	4.39	1.99
Nt <i>mg.L⁻¹</i>	0.79	1.01	0.9	2	14.2	4.55	0.36	5.36	1.57
HL <i>mol.L⁻¹</i>	1.6 10 ⁻⁷	3.4 10 ⁻⁷	2.5 10 ⁻⁷	1.9 10 ⁻⁷	4.8 10 ⁻⁷	3 10 ⁻⁷	1.3 10 ⁻⁷	4.2 10 ⁻⁷	2.2 10 ⁻⁷
PL <i>mol.L⁻¹</i>	1.4 10 ⁻⁸	1.6 10 ⁻⁷	6.8 10 ⁻⁸	1.5 10 ⁻⁷	1.1 10 ⁻⁶	4.6 10 ⁻⁷	5.4 10 ⁻⁸	5.2 10 ⁻⁷	1.6 10 ⁻⁷
PdB <i>mol.L⁻¹</i>	0	1.6 10 ⁻⁷	2.8 10 ⁻⁷	0	2 10 ⁻⁷	6.6 10 ⁻⁸	0	2.4 10 ⁻⁷	3.5 10 ⁻⁸

Avec : COT=Carbone Organique Total, Nt=azote total, HL=Humique Like, PL=Protéine Like et PdB=matière organique issue de la production microbiologique

b. Le Creux des Elaphes

Ce site a été suivi pour caractériser les écoulements épikarstiques, la cavité est sous l'épikarst à l'aplomb des coupes. Il permet d'identifier le rôle de l'épikarst sur le transfert des indicateurs des travaux sylvicoles liés à une remobilisation du sol. L'intérêt est que le flux de matière qui traverse cet épikarst n'est pas ou peu dilué par d'autres apports extérieurs. Il est donc possible de suivre directement le flux provenant du sol.

Dans le cadre de la thèse, le suivi de ce site a commencé en même temps que les travaux, du 25 Mai au 31 Juillet 2011. Afin de mettre en évidence l'impact des coupes, les données sont comparées à celles issues d'études antérieures réalisées entre Mars et Aout 2009 [Guyard 2009]. Deux venues d'eau de la grotte, chacune sous un type de sols différents, ont été retenues : la première sous un organosol (le point E1, Figure 2.21) et la seconde sous un sol brun (le point E3, Figure 2.21). La quantité d'eau infiltrée a pu être mesurée par l'intermédiaire d'un pluviomètre à auget (le ARG 100 Rainauge) installée dans la grotte. La quantité d'eau infiltrée est exprimée en mm.h⁻¹.

Suivi physico-chimique

Pour cette étude nous nous sommes intéressés au pH, à la température, à la conductivité, aux matières en suspension, au TOC et à 3 éléments chimiques (HCO₃⁻, Ca²⁺ et Mg²⁺). Au vu des résultats, l'interprétation aux points de prélèvement sous les deux types de sol a été réalisée en même temps.

Les mesures de température et de pH ne montrent pas de différences significatives entre les deux périodes. Le pH moyen reste aux alentours de 8.2 et la température moyenne est proche de 4.2 °C. Les mesures de la conductivité présentent des valeurs plus faibles en 2009 (40 μs.cm⁻¹ de moins). Cette différence s'explique par des phénomènes de dilution liées à l'influence de la fonte nivale sur la période 2009.

Les teneurs en matières en suspension sont différentes entre les périodes 2009 et 2011. Avant les travaux, le taux de matière en suspension était de l'ordre de 10^{-4} g.L⁻¹. Pendant la période d'activité sylvicole le taux atteint des valeurs allant de 10^{-3} à 10^{-2} g.L⁻¹, soit 10 à 100 fois plus élevées (Tableau 6.4).

Pendant la période des travaux, les mesures du COT montrent des valeurs très importantes supérieures à 4 mg.L⁻¹ avec un pic à 12 mg.L⁻¹. La période de référence 2009 permet de voir que la teneur la plus importante est d'environ 4 mg.L⁻¹ (Tableau 6.4). Les 3 éléments chimiques ne montrent pas de différences significatives entre les deux périodes et les 2 points de prélèvements.

Nous observons aussi une différence dans les quantités infiltrées d'eaux entre les deux périodes. Les suivis réalisés sur l'année 2009 montre des infiltrations ne dépassant pas les 60 mm.h⁻¹. Les précipitations sont aussi moins importantes, les cumuls journaliers sont de 35 mm. Sur la seconde période, les précipitations sont plus abondantes (jusqu'à 80 mm) et entraînent des quantités d'eau infiltrées importantes elles aussi (pouvant atteindre les 160 mm.h⁻¹. Les travaux de sylvicultures ont donc eu un impact sur la quantité d'eau infiltrée et par conséquent un impact sur la quantité de matériaux mobilisables.

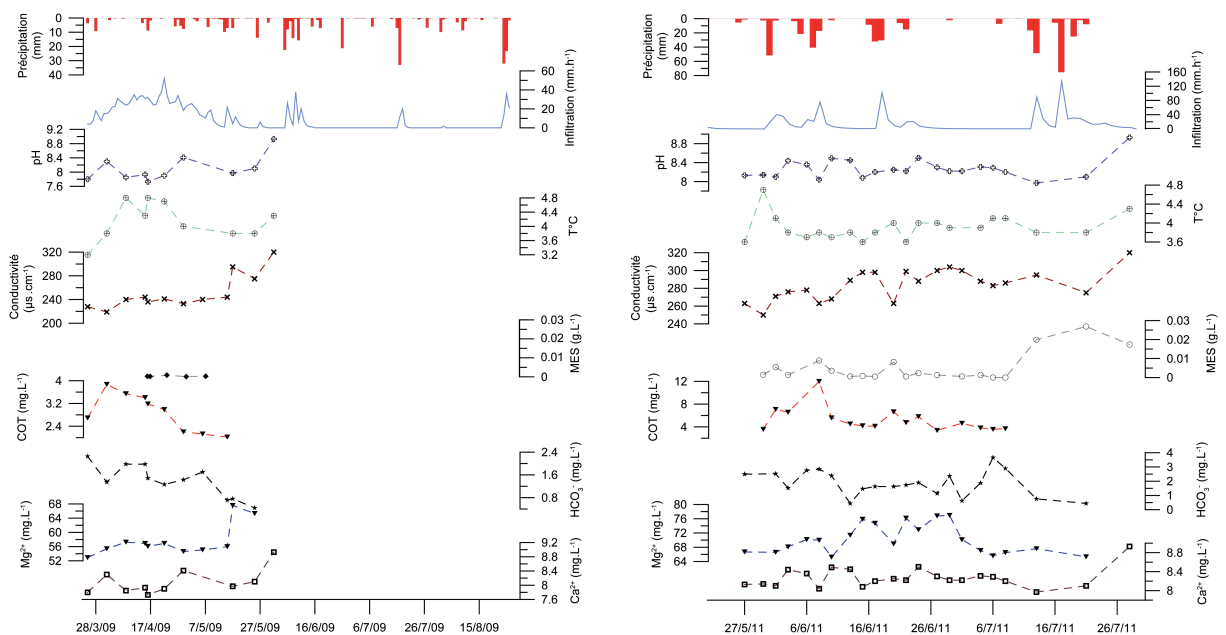


FIGURE 6.22 – Suivi physico-chimique d'un écoulement épikarstique sous un organosol

Avec : A. période de référence (2009), B. période des travaux sylvicoles (2011)

CHAPITRE 6. VULNÉRABILITÉ SPÉCIFIQUE LIÉE À LA REMOBILISATION ANTHROPIQUE OU NATURELLE DES SOLS

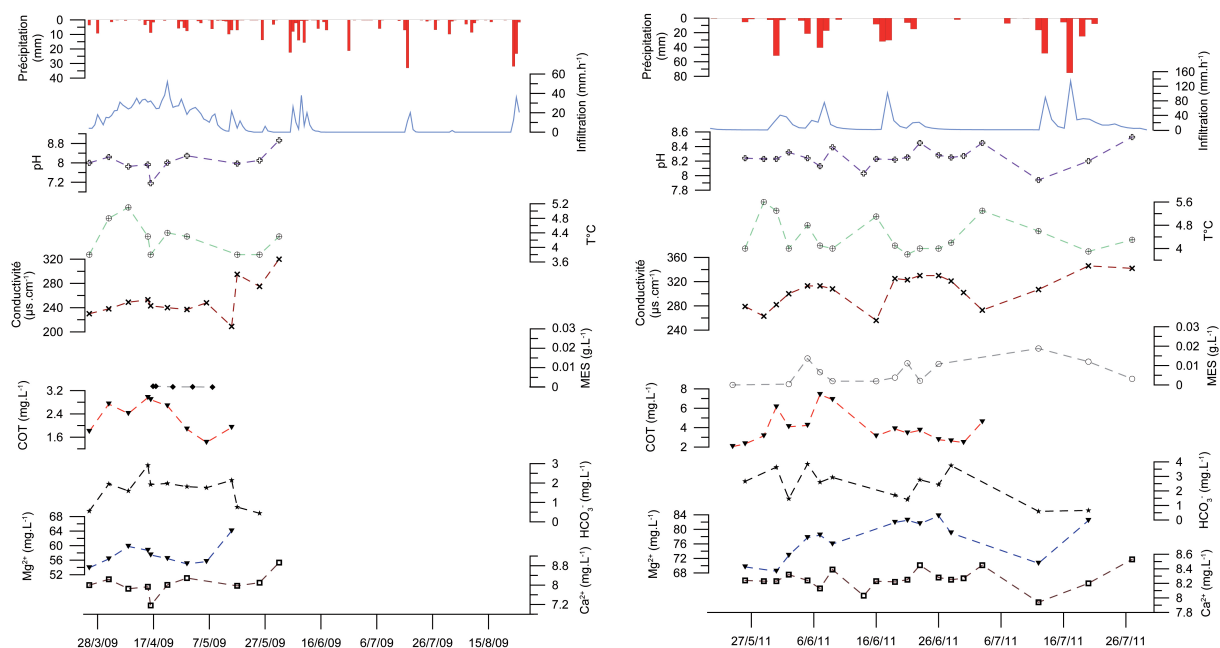


FIGURE 6.23 – Suivi physico-chimique d'un écoulement épikarstique sous un sol brun
Avec : A. période de référence (2009), B. période des travaux sylvicoles (2011)

Tableau 6.4 – Valeur des paramètres physico-chimiques avant et après les travaux de sylviculture sur le site du Creux des Elaphes

Avec : MES=Matière en suspension, COT=Carbone Organique Total, Nt=Azote total, X_O =point sous un organosol et X_B =point sous un sol brun

Paramètres	Avant les travaux (n=8)			Pendant les travaux (n=22)		
	Min.	Max.	Moyenne	Min.	Max.	Moyenne
MES_O $mg.L^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	0	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$5.3 \cdot 10^{-3}$
MES_B $mg.L^{-1}$	0	$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$6.4 \cdot 10^{-3}$
COT_O $mg.L^{-1}$	2	3.86	2.89	3.37	11.98	5.23
COT_B $mg.L^{-1}$	1.4	2.9	2.29	2.04	7.4	3.9
Nt_O $mg.L^{-1}$?	?	?	0.63	3.84	2.22
Nt_B $mg.L^{-1}$?	?	?	0.43	4.11	2.45

Suivi de la matière organique fluorescente

Pour le traitement des chroniques de fluorescence, les deux venues n'ont pas été dissociées. Les valeurs minimales, moyennes et maximales sont du même ordre de grandeur. Seule la réactivité et les valeurs d'intensité au cours d'un écoulement rapide (arrivée d'eau de surface) montrent des variations. Le fait qu'il ne parait pas y avoir de différence majeure entre ces deux venues en eau s'explique par des écoulements vraisemblablement latéraux au sein du système karstique. Il y a donc un mélange des venues en eau de surface dans l'épikarst.

Pendant la période 2009, le type humique présente des valeurs comprises entre $2.8 \cdot 10^{-7}$ et $4.5 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹. Au cours des travaux sylvicoles, les valeurs oscillent entre $3.5 \cdot 10^{-7}$ et $1 \cdot 10^{-6}$ mol.L⁻¹ (Tableau 6.5). Il y a globalement trois fois plus de matière de type humique dans les écoulements rapides durant les travaux.

Les mesures du type protéique montrent cette même tendance. En 2009, les valeurs varient de $2.1 \cdot 10^{-8}$ à $8.6 \cdot 10^{-8}$ mol.L⁻¹ alors que pendant les travaux les teneurs augmentent jusqu'à $6.8 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹ (Tableau 6.5).

Sur la période des activités, le fluorophore caractérisant l'activité microbiologique est présent de façon régulière au cours du temps avec des valeurs maximales de $1.8 \cdot 10^{-7}$ mol.L⁻¹ (Tableau 6.5). Sur l'année 2009, les valeurs d'intensité du fluorophore ne dépassent pas les $3.6 \cdot 10^{-8}$ mol.L⁻¹ (Tableau 6.5).

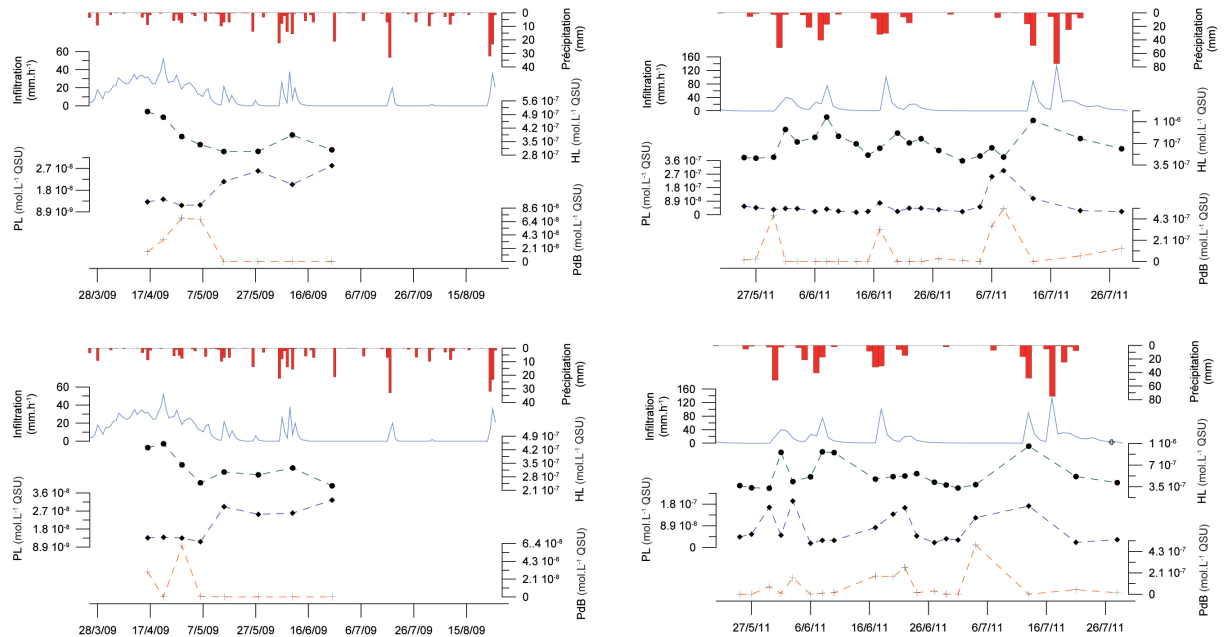


FIGURE 6.24 – Suivi de la matière organique fluorescente dans deux écoulements épikarstiques (organosol en haut, sol brun en bas)
Avec : A. période de référence (2009), B. période des travaux sylvicoles (2011)

Tableau 6.5 – Valeur des matières organiques fluorescentes avant et après les travaux de sylviculture sur le site du Creux des Elaphes

Avec : *HL*=Humique Like, *PL*=Protéine Like, *PdB*=matière organique issue de la production microbiologique, *X_O*=point sous un organosol et *X_B*=point sous un sol brun

Paramètres	Avant les travaux (n=8)			Pendant les travaux (n=22)		
	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Min.</i>	<i>Max.</i>	<i>Moyenne</i>
$\frac{HL_O}{mol.L^{-1}}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$3.7 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$6.8 \cdot 10^{-7}$
$\frac{HL_B}{mol.L^{-1}}$	$2.3 \cdot 10^{-7}$	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5.4 \cdot 10^{-7}$
$\frac{PL_O}{mol.L^{-1}}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$	$6.7 \cdot 10^{-8}$	$4.4 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$
$\frac{PL_B}{mol.L^{-1}}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$	$7.7 \cdot 10^{-8}$	$4.9 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$4.6 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$
$\frac{PdB_O}{mol.L^{-1}}$	0	$2.9 \cdot 10^{-8}$	$9.8 \cdot 10^{-9}$	$3.3 \cdot 10^{-15}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$
$\frac{PdB_B}{mol.L^{-1}}$	0	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$4.9 \cdot 10^{-7}$	$2.6 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$3.3 \cdot 10^{-8}$

2.2.2 Systèmes non impactés

a. La Roche Saint Alban

Le bassin d'alimentation de ce système karstique a fait l'objet des travaux les plus importants (Tableau 6.2). Une piste de 710 m linéaire (mobilisant 3700 m³ de terre et 150 m³ de roche) dans les calcaires du Kimméridgien et de nombreuses coupes ont été réalisées. Les mesures sur la chronique physico-chimique (Figure 6.25) ne montrent pas de valeur sortant de la normale.

Suivi physico-chimique

La conductivité oscille entre 240 et 340 $\mu S.cm^{-1}$ avec une moyenne de 300 $\mu S.cm^{-1}$. Les valeurs très basses en hiver sont dues à des phénomènes de dilution par alimentation continue de la fonte d'une partie de la couverture neigeuse. A contrario, elles sont très importantes en été marquées par des écoulements lents et des phénomènes de reconcentration au sein du karst. Les températures suivent les mêmes tendances que la conductivité, elles diminuent en hiver et augmentent en été. Les valeurs de température et de conductivité peuvent marquer des hausses après des précipitations indiquant des effets de piston ou de reprise d'eau au sein du système karstique.

Les valeurs de turbidité, lors de crues, montrent des pics importants après des longues périodes de récession et des précipitations abondantes. Toutefois, toutes les crues n'apportent pas forcément une quantité importante de matière en suspension. L'UV254, indicateur du degré d'aromaticité de la matière organique, semble montrer des valeurs importantes lors des hautes eaux. Deux périodes atypiques apparaissent, la première de Décembre 2009 à Mars 2010 et la seconde de Juillet à Aout 2011. Lors de ces deux périodes, les valeurs sont maximales, cependant nous n'avons pas d'explications pour ces tendances. A noter que les mêmes hausses ont été observées

sur les autres sites de façon plus ou moins marquée.

Le carbone organique total et l'azote total ont des valeurs qui augmentent avec les pics de crue, caractérisant un apport exokarstique de matière organique. Néanmoins, en période d'étiage, les valeurs de ces deux paramètres sont très élevées (4 mg.L^{-1} pour le COT et 3 mg.L^{-1} pour le Nt). Cette augmentation semble due à des circulations lentes ou à des phénomènes de reconcentration au sein du karst.

Tous les paramètres physico-chimiques paraissent dans une gamme de valeur normale, aucune anomalie n'est observée lors des travaux de sylviculture.

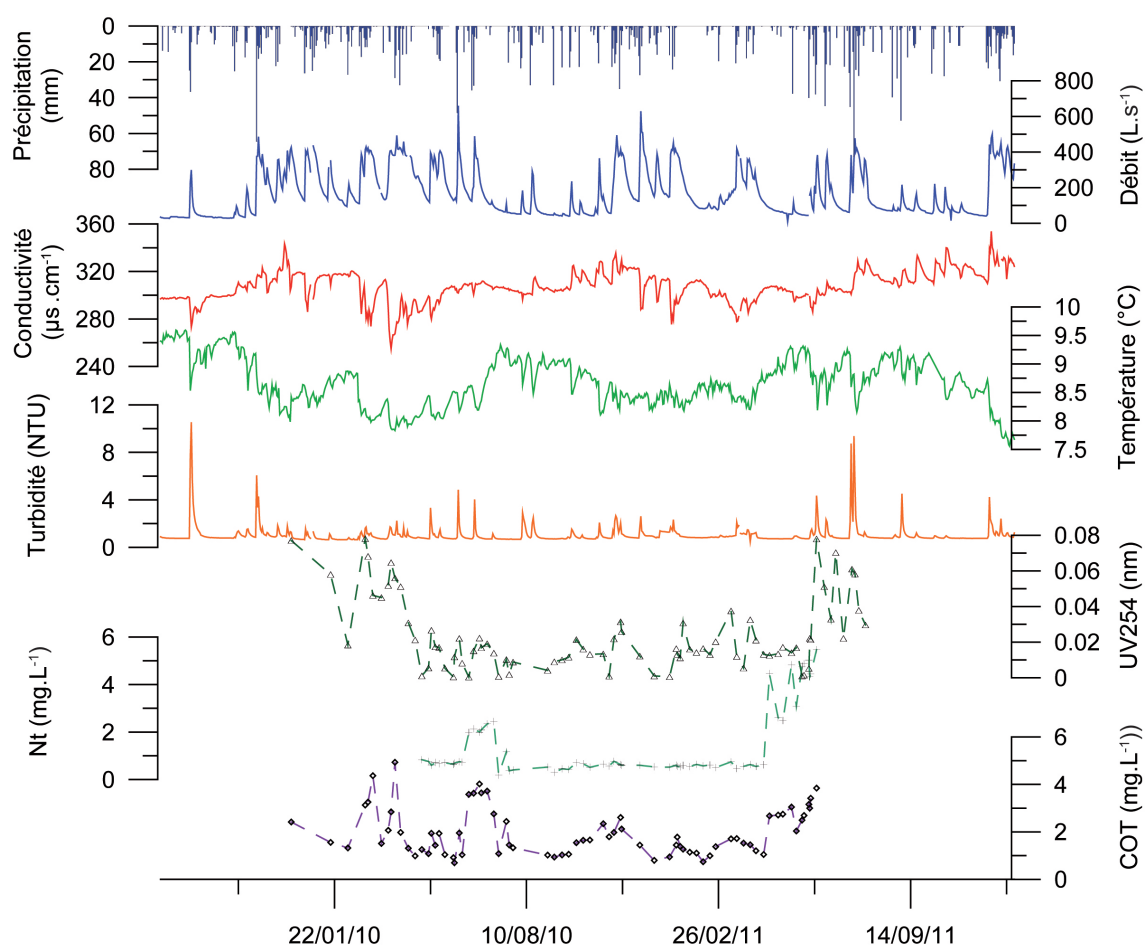


FIGURE 6.25 – Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban

Suivi de la matière organique fluorescente

Le suivi de la matière organique fluorescente (Figure 6.26) ne montre pas d'anomalie sur le cycle hydrologique. La matière organique fluorescente du type humique apparaît toujours lors d'une crue. Les venues les plus importantes se situent en période de hautes eaux. Ce type de matière est un bon indicateur des venues exokarstiques.

La matière organique du type protéique n'a pas pu être suivie en continu, l'interprétation des venues est donc plus complexe à réaliser. Toutefois, comme pour les paramètres de COT et de Nt, les valeurs de la matière organique apparaissent plus importantes en période d'étiage. La raison la plus probable serait que sur cette période les écoulements lents auraient une origine épikarstique.

Les matières organiques ayant pour origine une production bactérienne montrent des pics en début de crue après des périodes de récession indiquant une reprise d'eaux stagnantes.

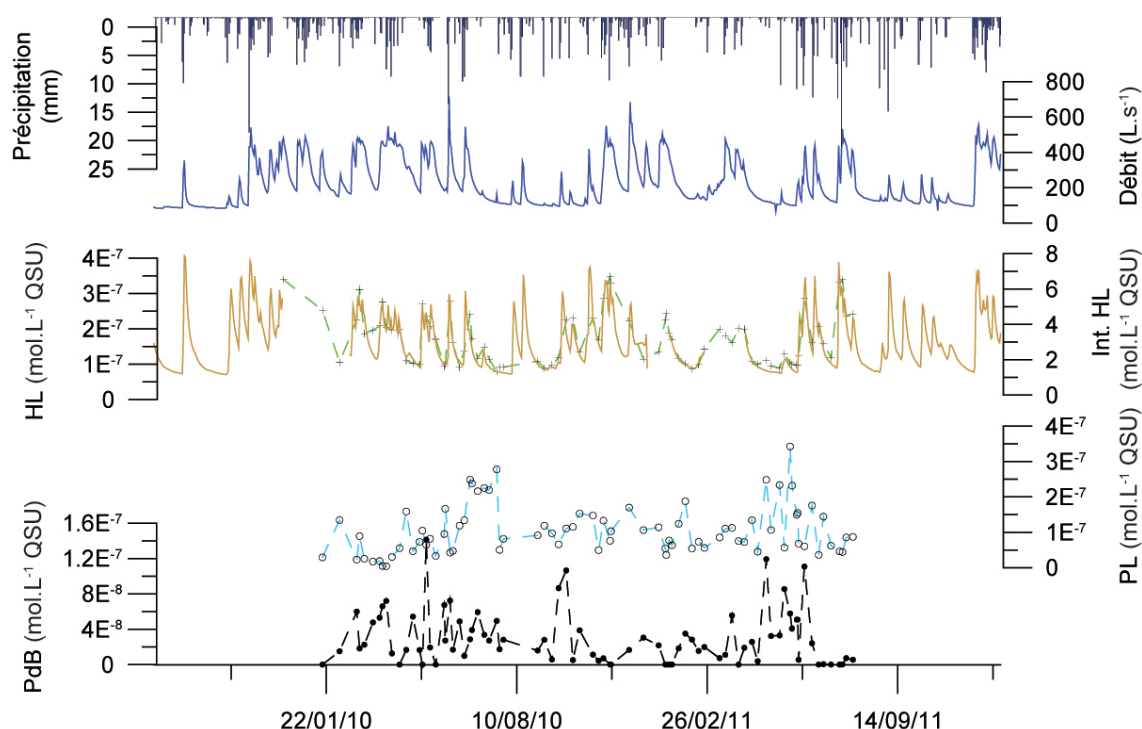


FIGURE 6.26 – Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de La Roche Saint Alban

Les valeurs de turbidité, de COT de Nt et d'intensité de fluorescence pour la matière organique restent normales. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette absence d'impact. Les analyses hydrodynamiques et hydrochimiques mettent en évidence une zone noyée importante. Cette zone permet une bonne homogénéisation des eaux et de minimiser une pollution par dilution (en fonction du cycle hydrologique). Ce système est peu propice à un impact lié à la remobilisation du sol. La localisation des travaux sur des sols du type brun et du type organosol reposant sur une roche

mère compacte joue un rôle important dans la protection du système. La carte de vulnérabilité réalisée indique que les zones des activités ne sont pas sensibles. Enfin, le dernier facteur est la distance assez importante des travaux par rapport à la source.

b. Fontaine Noire

Le système karstique a été défini comme très vulnérable. Il est en effet très développé et ne possède pas une grande zone noyée pouvant atténuer une pollution. Les travaux ont consisté en une coupe sur une forêt irrégulière avec débusquage et débardage à l'aide d'un tracteur forestier (Tableau 6.2). Ils ont eu lieu dans les périmètres de protection immédiate et rapprochée sur une zone couvrant 15 hectares.

Suivi physico-chimique

Les suivis physico-chimiques sont présentés figure 6.27. Les valeurs de conductivité évoluent entre 240 et 420 $\mu\text{s.cm}^{-1}$. Elles chutent lors des pics de crue et augmentent en période de récession. Les baisses les plus significatives apparaissent après une longue période de récession. Tous les pics de débits entraînent une chute de la conductivité. Sur le site de Fontaine Noire, le capteur de température subit les variations des conditions extérieures, les mesures ne sont donc pas exploitables.

Les pics de turbidité apparaissent pendant les périodes de crue, ils avoisinent en général des valeurs de 15 NTU, mais peuvent atteindre les 50 NTU. Pendant les périodes de travaux, il n'y a pas de pic important visible caractérisant une remobilisation du sol.

L'UV254 montre comme sur tous les sites des augmentations en période de crue, ce qui indique un apport de matière organique.

Les valeurs du carbone organique total et de l'azote total augmentent en période de crue indiquant des venues extérieures. Toutefois, en période de forte récession les valeurs augmentent fortement et présentent des valeurs maximales (5 mg.L^{-1} pour le COT et le Nt).

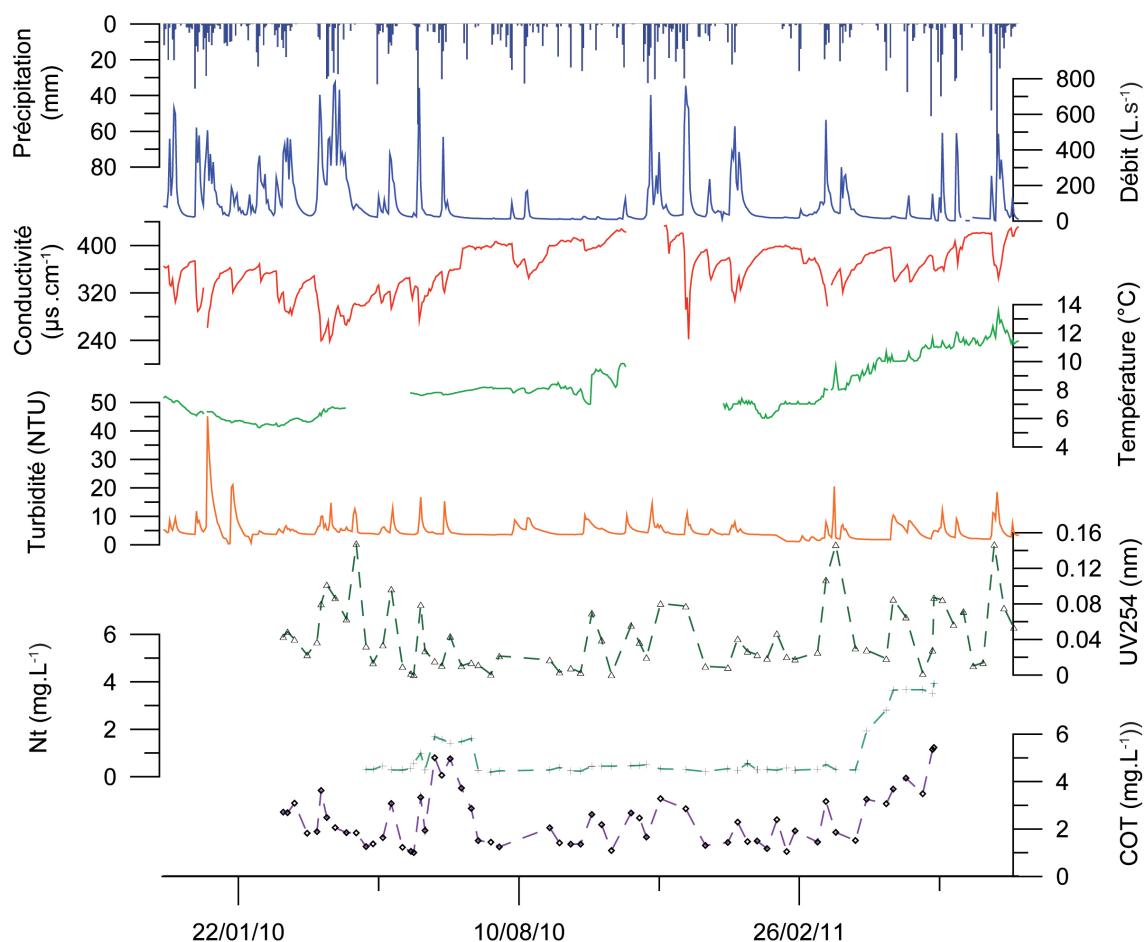


FIGURE 6.27 – Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de Fontaine Noire

Suivi de la matière organique fluorescente

Les matières organiques fluorescentes (Figure 6.28) ont essentiellement été suivies par un échantillonnage hebdomadaire. Les venues de matières organiques du type humique arrivent en période de crue et caractérisent toujours des venues de surface. Des faibles débits peuvent entraîner d'importantes venues de matière organique. C'est ce que nous pouvons observer pour le mois d'Octobre 2010 où les précipitations engendrent une légère augmentation des débits, mais les valeurs de matière organiques du type humique atteignent les $4.5 \cdot 10^{-7} \text{ mol.L}^{-1}$.

Les matières organiques du type protéique montrent une augmentation progressive et importante en période d'étiage. Seul un pic de forte concentration apparaît en Octobre 2011, cependant aucun travaux n'étaient programmés sur cette période.

Les matières organiques provenant de l'activité microbiologique ont des valeurs importantes lors des petites crues d'Octobre 2011, indiquant une probable reprise d'eau stagnante au sein du système karstique.

Bien que la méthode PaPRIKA prévoit que le lieu des coupes possède une vulné-

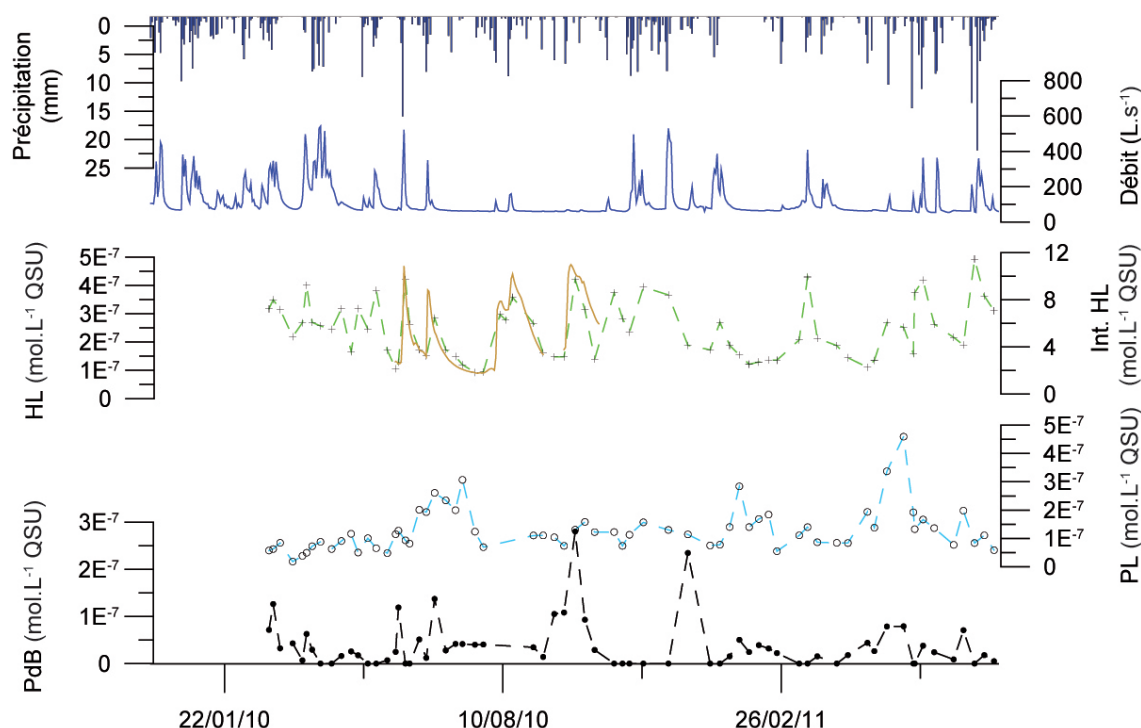


FIGURE 6.28 – Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de Fontaine Noire

tabilité moyenne à forte, il n'y a pas eu de changement important dans les paramètres suivis. Le fait qu'il n'y ait pas d'impact pourrait être induit par la nature du sol. Celui-ci est du type brun (très argileux) d'une profondeur assez importante (proche du mètre) jouant un rôle de tampon. Ce résultat confirme la suggestion du chapitre 5 qui proposait que le critère sol devrait avoir un poids plus important lors de la réalisation de cartes de vulnérabilité dans les systèmes de moyenne montagne.

c. Fontaine Froide

Pour le système de Fontaine Froide, nous n'avons pas eu connaissance de travaux réalisés au cours de l'étude menée. Nous présentons, ici, les suivis effectués afin de valider les résultats obtenus sur les autres sites.

Suivi physico-chimique

Le site de Fontaine Noire a été le plus difficile à suivre, les résultats physico-chimiques sont présentés figure 6.29. Les hauteurs d'eau sont mesurées au niveau de l'exutoire principal, le trop plein situé au dessus, n'étant pas équipé, il est donc impossible d'estimer les débits totaux. Pendant le suivi de la source, nous avons rencontré un grand nombre de problème au niveau du suivi continu, c'est pour cette raison que les chroniques de la mesure de conductivité et de température présentent beaucoup de lacunes. Toutefois, nous pouvons observer que les crues entraînent une baisse des valeurs de conductivité et de température tandis que les périodes de récessions permettent des reconcentrations des éléments et un réchauffement des eaux. Les mesures de turbidité n'ont pas pu être réalisées pendant l'étude.

Cependant, si en regardant les valeurs d'UV254, nous pouvons noter qu'elles sont élevées en période de hautes eaux ainsi que pendant les pics de crue.

Les valeurs de carbone organique total et d'azote total augmentent en période de crue marquant des venues d'eau de surface. Comme pour tous les autres sites, les valeurs de COT et de Nt augmentent pendant les périodes de récessions.

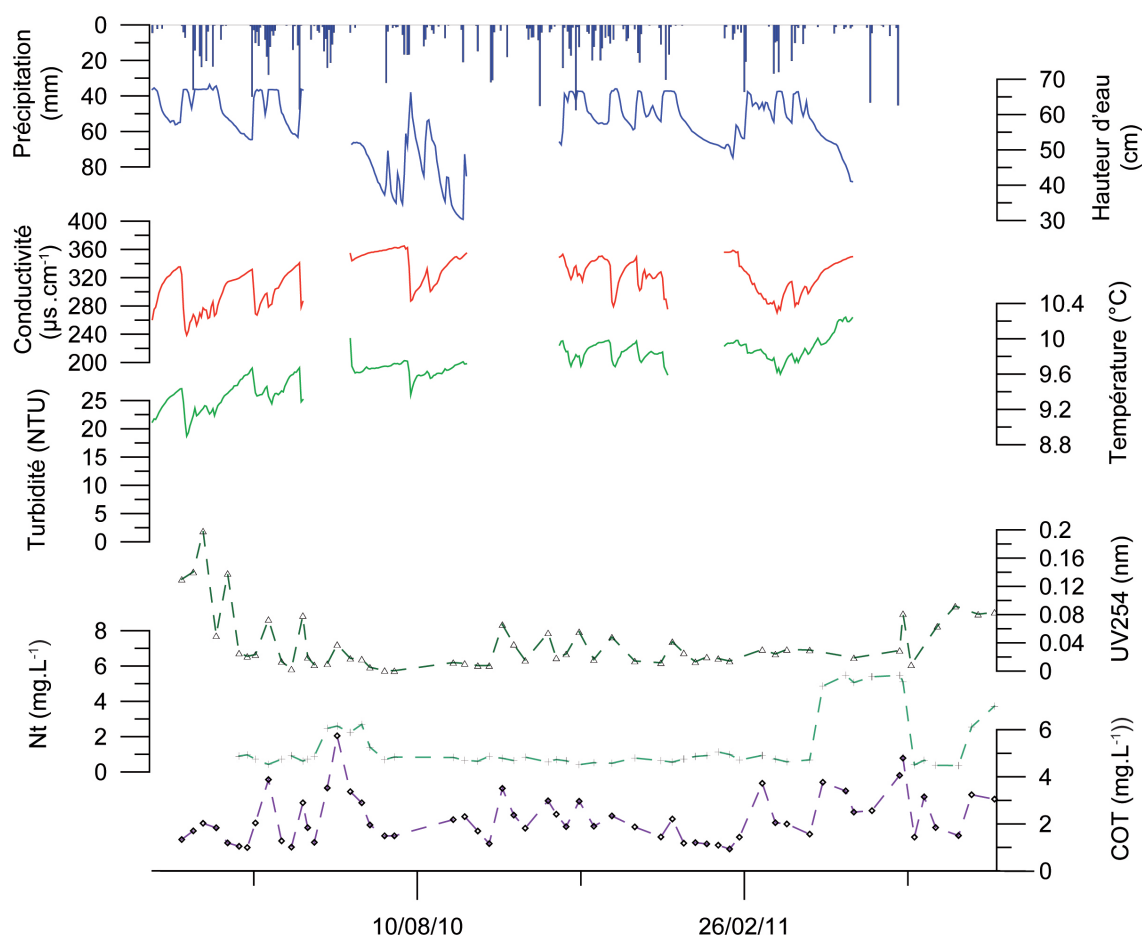


FIGURE 6.29 – Suivi physico-chimique à l'émergence du système karstique de Fontaine Froide

Suivi de la matière organique fluorescente

Les matières organiques fluorescentes ont été suivies de façon ponctuelle (Figure 6.30). Tout comme pour les différents sites étudiés, les valeurs de matière organique fluorescente du type humique augmentent avec les crues. Les matières du type protéique sont essentiellement élevées en période d'étiage. Les matières issues de la dégradation bactérienne sont, ici, difficiles à comprendre, elles semblent néanmoins augmenter en début de crue après une forte récession.

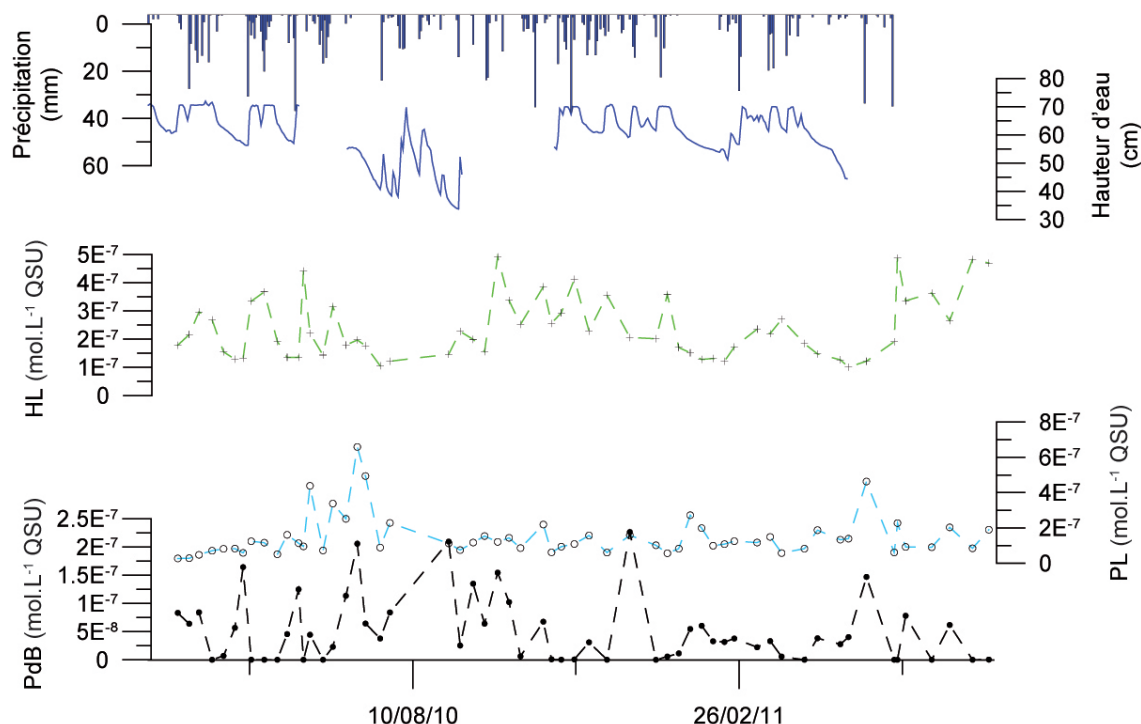


FIGURE 6.30 – Suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence du système karstique de Fontaine Froide

2.3 Conclusion

Les suivis physico-chimiques et des matières organiques fluorescentes sur cinq sites d'étude ont permis de mettre en évidence plusieurs indicateurs caractérisant l'impact de la sylviculture et en particulier une remobilisation du sol. Nous avons pu observer dans les crues pendant ou après les travaux :

- ◇ un pic important d'azote total (15 mg.L^{-1}),
- ◇ une augmentation des valeurs du carbone organique total (jusqu'à 12 mg.L^{-1}),
- ◇ des venues très importantes des matières organiques fluorescentes du type humique et en particulier du type protéique,
- ◇ des fortes teneurs en matière en suspension (turbidité), pouvant se réitérer pendant plusieurs crues.

Les autres paramètres ne montrent pas de variations significatives, ce qui ne permet pas de les inclure en tant qu'indicateur de remobilisation spécifique du sol.

Plusieurs raisons peuvent expliquer l'absence d'impact sur les sites où des travaux ont été réalisés :

- ◇ une distance trop grande entre les travaux et l'exutoire du système karstique,
- ◇ une zone noyée importante qui permet une bonne homogénéisation des eaux,
- ◇ un sol très épais jouant un rôle de tampon.

3 Conclusion (Conceptualisation / Caractérisation des écoulements au sein du système karstique

L'étude de la vulnérabilité spécifique liée à la remobilisation des sols s'est effectuée à partir du suivi de la matière organique fluorescente. Les matières du type protéique et issues de la production microbiologique ont été étudiées par échantillonnage hebdomadaire, rendant la compréhension de leurs venues assez difficile. L'utilisation du fluorimètre de terrain a permis uniquement de suivre en continu les matières organiques du type humique. Par ce suivi en continu nous avons pu croiser les données obtenues avec le débit. Ainsi, les analyses corrélatoires qui en résultent ont montré que la réactions des débits mesurées varient dans le temps (de 1 à 3 jours) après une pluie en fonction des périodes hydrologiques. Toutefois, les venues en matières organiques paraissent arriver toujours avec le même délai. Les flux de matières organiques, quant à eux, sont beaucoup plus importants en période de basses eaux et sont dilués en hautes eaux.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la composition de la turbidité. L'étude des faibles quantités de matières en suspension (environ 0.02 g pour 40 L d'eau) fait apparaître que la composition de la turbidité est identique sur les différents sites et sur la même période hydrologique. Les sédiments sont principalement composés de carbonates, d'argiles et de matières organiques provenant de l'endo et de l'exokarst. Le croisement des données de la turbidité et des matières organiques du type humique permet d'identifier la composition de la turbidité au cours d'une crue et donc de connaître si la turbidité est riche en matière minérale ou en matière organique. De plus, le croisement de ces données permet également de caractériser les origines endo ou exokarstiques pendant la crue en utilisant le rapport turbidité sur fluorescence des matières du type humique.

L'étude de la matière organique en fonction du COT a permis d'identifier des relations entre ces deux paramètres en fonction des cycles hydrologiques. Il existe une bonne corrélation entre la matière organique du type humique et le COT en hautes eaux (hiver/printemps) et en période intermédiaire (fin été/automne). Toutefois, pendant les basses eaux (étiages) la corrélation est moins précise, due à un changement dans la nature de la matière organique du type humique mais aussi à des phénomènes de reconcentration de la matière organique du type protéique dans les eaux. Néanmoins, il a été possible de reconstituer le flux de COT au cours de l'année grâce aux relations avec la matière organique fluorescente. Le fluorimètre de terrain peut donc suivre en continu le COT dans les eaux en réalisant des ajustements en fonction de la période hydrologique.

Les indicateurs pertinents liés à la remobilisation du sol dans un bassin d'alimentation karstique sont les matières organiques fluorescentes du type humique et protéique, l'azote total et le carbone organique total. La forte augmentation de ces paramètres a pu être observée lorsque les travaux se localisaient dans des zones de fortes vulnérabilités (à l'aplomb du site d'étude ou sur un organosol reposant sur une roche mère très fracturée). A contrario, une distance trop importante des travaux par rapport à la surface, une grande zone noyée ou un sol épais tamponnant le

milieu peuvent expliquer l'absence d'impact même si les travaux ont été conséquents (comme la création d'une piste forestière).

Le suivi de la matière organique fluorescente à l'émergence des quatre sources permet de mieux comprendre les écoulements au sein des systèmes karstiques (Figure 6.31). Ainsi chacun des types de matière organique possède une caractéristique qui lui est propre :

- ◊ la matière organique du type humique est toujours présente au cours des crues, elle caractérise les venues rapide de surface,
- ◊ la matière organique du type protéique atteint des valeurs importantes lors des périodes de récession. Elle marque des écoulements en eaux lentes reconcentrées et provenant vraisemblablement de l'épikarst. Ce type de venue est associé à des fortes valeurs de COT et de Nt liées aussi à des phénomènes de reconcentration,
- ◊ la matière organique issue de la production bactérienne, semble provenir d'une reprise d'eau stagnante. Cette observation a été faite suite à une analyse d'un même échantillon à 1 mois d'intervalle. Lors de la première analyse, ce type de matière n'était pas observable alors que lors de la seconde analyse, après 1 mois, ce type était identifié et présenté une forte concentration.

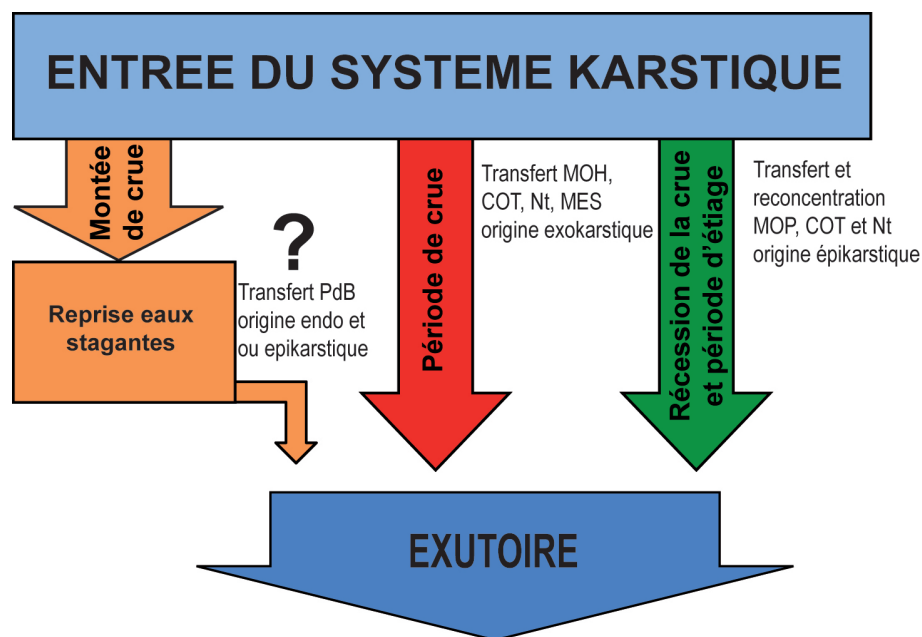


FIGURE 6.31 – Schématisation des transferts au sein d'un système karstique
Avec : PdB=Production issue des Bactéries, MOP=Matière Organique du type Protéique, MOH=Matière Organique du type Humique, COT=Carbone Organique Total, Nt=Azote total et MES=Matière En Suspension

Chapitre 7

Vulnérabilité spécifique des systèmes karstiques montagnards face au "changement climatique"

Pour ce chapitre nous nous sommes intéressés à la ressource en eau par l'intermédiaire de deux axes d'étude. Le premier axe a consisté en l'étude des variations des températures et des précipitations à partir de trois stations météorologiques (Météo France) : Lescheraines (650 m), Aillon-le-Jeune (900 m) et Voglans (245 m). Les deux premières stations appartiennent au massif des Bauges et possèdent un suivi des températures depuis 1980 et des précipitations depuis 1950. La dernière se situe dans la plaine chambérienne et relève les températures et les précipitations depuis 1974.

A défaut d'autres paramètres disponibles sur le long terme, le second axe se concentre sur les analyses des débits de trois systèmes ayant des contributions d'alimentation différentes : la rivière du Chéran, la source du Groin et l'exutoire de Bange - l'Eau Morte (Cf Chapitre 2). Les trois sites permettent d'étudier la question du changement climatique en comparant un cours d'eau de surface fortement influencé par le karst, une source alimentée par un bassin versant relativement étendu et binaire avec plusieurs cours d'eau superficiels tel que le Séran, et l'exutoire d'un petit bassin karstique de montagne.

- L'alimentation de la rivière du Chéran provient d'une part du ruissellement des eaux de pluie qui est la contribution la plus importante, et d'autre part de l'alimentation de sources karstiques réparties sur son bassin versant. Le suivi de la rivière à la station de jaugeage de la Charniaz (commune d'Allèves 575 m juste à l'aval de Lescheraines, BV = 249 km²) s'est effectué sur la période 1960 - 2011 (données Banque Hydro, DREAL).

- La station de jaugeage du Groin suit principalement, depuis 1960 (données Banque Hydro, DREAL), au minimum le débit des écoulements des ruisseaux de l'Arvière et du Groin (BV = 42 km²) vraisemblablement augmenté du débit du système karstique du Groin pour une superficie totale de 204.44 km² (Cf chapitre 2).

- Le suivi de la source karstique de Bange - l'Eau Morte consiste à la mesure du débit de l'ensemble : exutoire pérenne (source du Nant de la Combe) et trop plein

(porche des Eaux Mortes) pour un bassin versant de 12.3 km². Les suivis des débits sur la période 1982 - 2002 ont été assurés par M. Lepiller (Université d'Orléans). A partir de 2003, la station a été intégrée à la Banque Hydro de la DREAL qui a enregistré les hauteurs d'eau sans toutefois avoir réalisé à ce jour la courbe de tarage pour les convertir en débits. C'est pourquoi nous ne pouvons pas intégrer la dernière décennie à nos calculs.

Cette étude a été réalisée dans le but d'identifier les changements ou plutôt les tendances des variations des débits liées aux variations des températures et des précipitations.

1 Traitement des données

Plusieurs traitements de données ont été réalisés au cours des trois années de recherche. Nous proposons d'expliquer ici les différents traitements employés afin de répondre au mieux aux problématiques posés.

1.1 Traitement spécifique des données

Le traitement spécifique des données des chroniques a été réalisé pour identifier l'impact du changement climatique. Nous aborderons dans cette partie les différentes méthodes utilisées pour répondre à la problématique.

Les débits mensuels moyens

Les débits mensuels moyen MNQ_i représentent les moyennes interannuelles des débits journaliers moyens d'un mois civil [OFEV 2007].

$$MNQ_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Q_{d,i,k} \text{ du mois } i \quad (7.1)$$

Avec : $Q_{d,i}$ les débits journaliers moyens du mois i et n le nombre de valeurs mesurées.

Le débit annuel moyen

Le débit annuel moyen MQ représente la moyenne interannuelle des débits journaliers moyens d'une année civile [OFEV 2007].

$$MNQ = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Q_{d,k} \quad (7.2)$$

Avec : Q_d les débits journaliers moyens et n le nombre de valeurs mesurées.

La crue annuelle moyenne (débit journalier)

La crue annuelle moyenne MHQ (débit journalier) est la moyenne interannuelle des crues annuelles, i.e. de la valeur maximale du débit journalier moyen qui est relevée durant une année civile [OFEV 2007].

$$MHQ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{d,max,j} \quad (7.3)$$

Avec : $Q_{d,max,j}$ la crue annuelle (valeur maximale du débit journalier moyen d'une année) et n le nombre d'année.

La valeur seuil de crue (débits journaliers)

La grandeur auxiliaire de la valeur du seuil de crue Q^* (débits journaliers) indique l'ordre de grandeur du débit à partir duquel on suppose qu'il y a transport de sédiments et modifications du lit d'eau [OFEV 2007].

$$Q^* = 0.6MHQ \quad (7.4)$$

Avec : MHQ la crue annuelle moyenne.

La fréquence moyenne de crue (débits instantanés)

La fréquence moyenne de crue f_{HQ} (débits instantanés) est la moyenne interannuelle du nombre annuel d'événements de crue indépendants qui dépassent la valeur seuil de crue [OFEV 2007].

$$f_{HQ} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\text{nombre annuel d'événements indépendants avec } Q > Q^*). \quad (7.5)$$

Avec : Q le débit instantané de l'année j , Q^* la valeur seuil de crue et n le nombre d'années.

Le Q_{mna_5}

Le Q_{mna} correspond au débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A). Par définition, il se calcul à partir d'un mois calendaire. Le Q_{mna} 5 ans est la valeur du Q_{mna} telle qu'elle ne se produit qu'une année sur cinq. Sa définition exacte est "débit mensuel minimal ayant une probabilité de 1 sur 5 de ne pas être dépassé une année donnée".

Le $V_{cn_{10}}$

Il correspond au plus faible débit moyen de 10 jours consécutifs relevé sur une période donnée de l'année.

Détermination du pic de crue marquant le début de la fusion printanière

L'estimation de la date de la fusion printanière s'est réalisée à partir des chroniques des débits. Nous avons cherché le pic de crue le plus important marquant la fin de l'hiver (Figure 7.1). Ce pic n'est pas toujours bien défini, il a été dans certains cas identifié de façon peu précise.

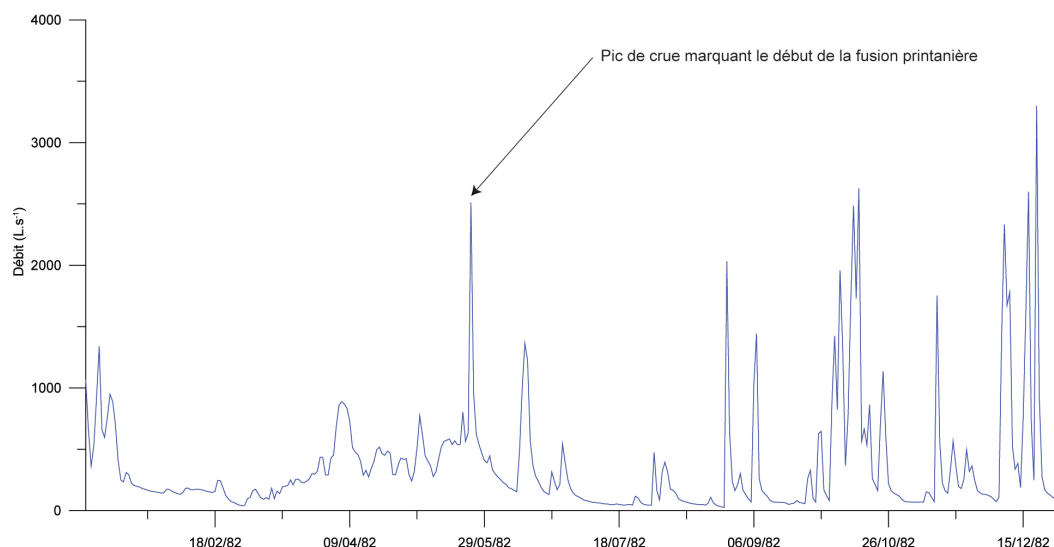


FIGURE 7.1 – Pic de crue marquant le début de la fusion printanière, exemple sur la chronique de 1982 de Bange - l'Eau Morte

Détermination de l'évapotranspiration

Pour calculer l'évapotranspiration, nous avons utilisé la formule de Turc [1959], établie à partir de l'étude statistique de 254 bassins versants situés sous tous les climats du globe. Elle s'écrit de la façon suivante :

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (7.6)$$

Avec : D le déficit d'écoulement annuel (mm), P la hauteur annuelle de précipitation (mm) et

$$L = 300 + 25T + 0.25T^3 \quad (7.7)$$

Avec : T la température annuelle de l'air (°C)

Cette formule ne peut s'appliquer qu'à des valeurs moyennes interannuelles de températures et de précipitations en un lieu ou un bassin versant donné [Turc 1959].

2 Etude de l'évolution du climat local

Nous avons réalisé une courbe ombro thermique de Gaussen pour les trois stations météorologiques de l'étude sur la période 2000-2004 (Figure 7.2). Globalement, nous observons les mêmes tendances pour les trois stations. Les courbes de températures sont en dessous des courbes des précipitations ce qui signifie tous les mois sont considérés comme humide. Toutefois, nous observons que les mois de Mai, de Juin et de Septembre sont les plus proches de la courbe des températures et sont donc plus secs. La température maximale est atteinte, pour les trois stations au mois de Juillet.

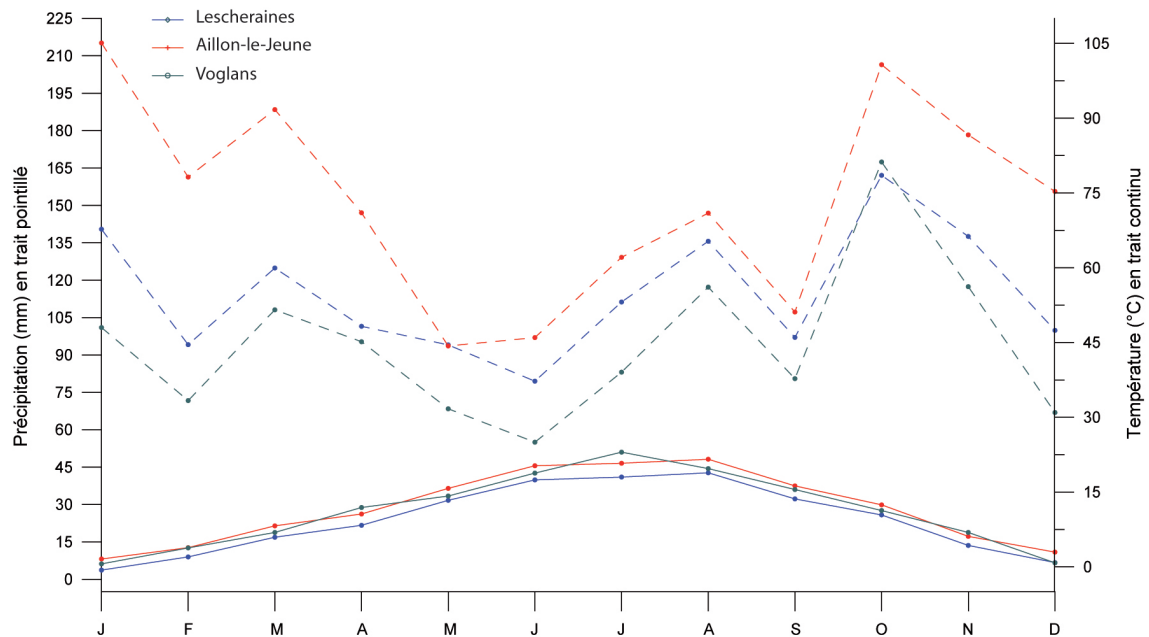


FIGURE 7.2 – Courbes ombro-thermiques de Gaussen de trois stations météorologiques : Lescheraines, Aillon-le-Jeune et Voglans (2000-2004)

2.1 Analyse de l'évolution des températures

L'étude de l'évolution du climat a commencé avec l'analyse des variations des températures. La figure 7.3 présente l'écart à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées à la station de Voglans sur la période 1974 - 2011. Nous observons que sur 37 ans, la température moyenne est de 11.3°C et fluctue de + ou - de 1.3°C. La valeur de la pente de la droite de tendance est de 0.043, ce qui signifie que cette tendance montre une augmentation des températures de 0.043°C par année. Depuis 1974, la température moyenne annuelle a augmenté de + 1.5°C. De 1974 à 1986, les températures oscillent mais aucune tendance ne s'impose. A partir de 1987, la quasi totalité des valeurs de températures mesurées à la station de Voglans se situent au dessus de la moyenne interannuelle de 11.3°C.

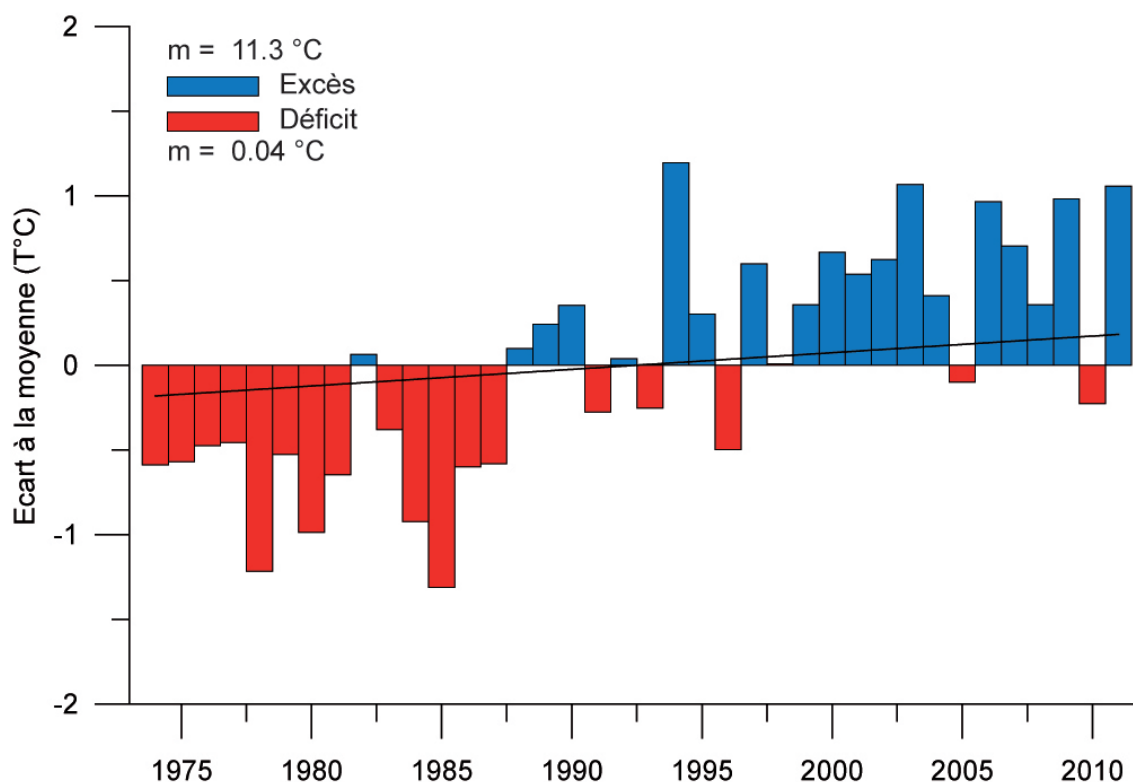


FIGURE 7.3 – Ecart à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées à la station de Voglans (1974-2011)

La figure 7.4 présente l'écart à la moyenne des températures moyennes mensuelles mesurées à la station de Voglans sur la période 1974 - 2011. Globalement, nous observons que depuis 1974, tous les mois sont marqués par une augmentation des températures. Les mois de Janvier, Février et Décembre présentent les plus faibles augmentations de températures avec des valeurs de pente de droite de tendance respectives de 0.0098, 0.0113 et 0.0001.

Les augmentations de température des mois d'Avril, Mai et Juin présentent des pentes dix fois plus importantes avec les valeurs respectives de 0.84, 0.097 et 0.094. Les mois d'Avril et de Mai sont, dans la région pré-alpine, représentatives des périodes de début de fusion de la couverture neigeuse. Une augmentation rapide des températures durant ces périodes entraîne un phénomène de fonte plus précoce et plus rapide. Le couvert neigeux ne permet donc plus d'alimenter les ressources en eaux jusqu'aux périodes estivales.

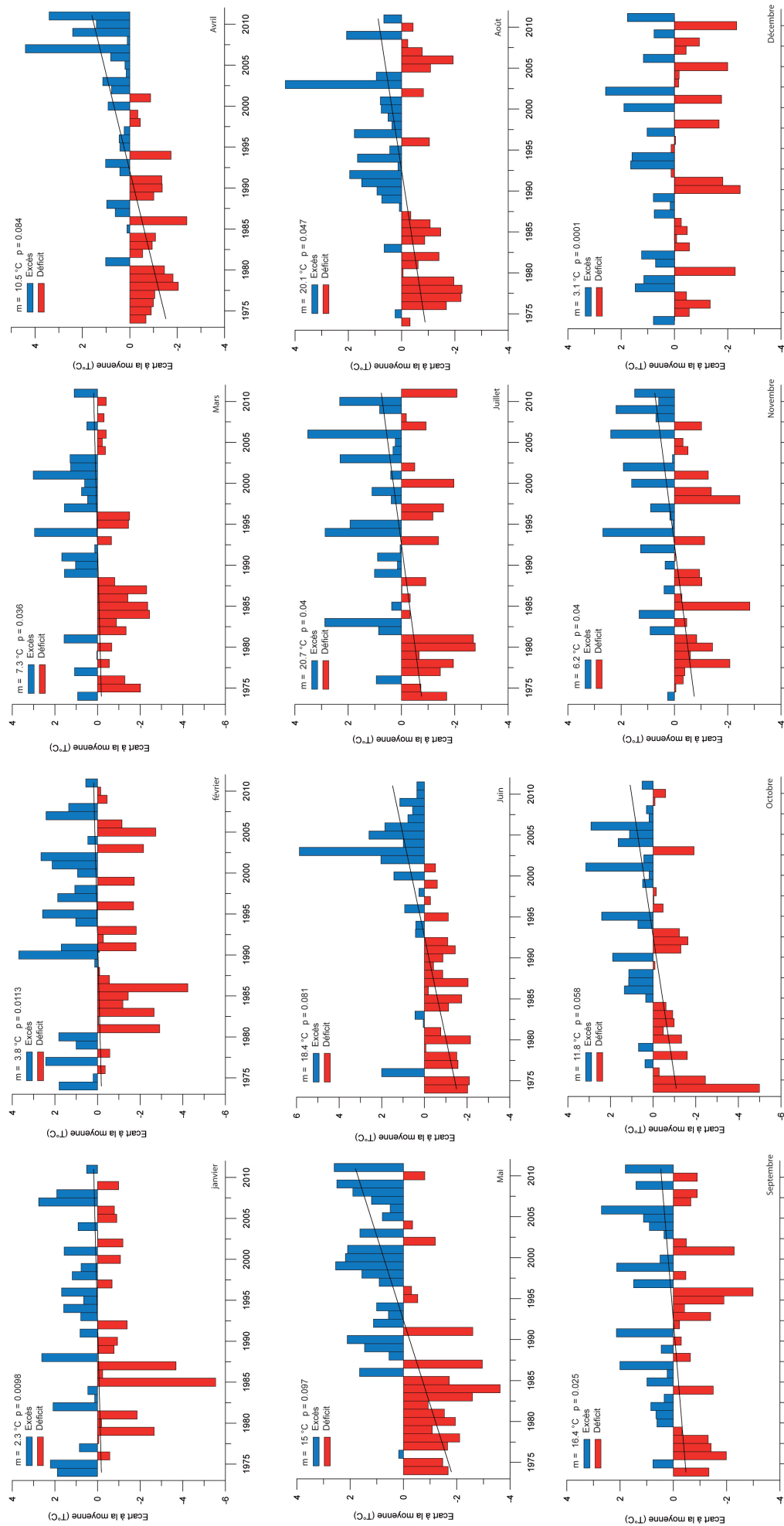


FIGURE 7.4 – Ecart à la moyenne des températures moyennes mensuelles mesurées à la station de Voglans (1974-2011)

La longueur de la durée de nos données de température étant moins conséquente sur les stations d'Aillon-le-Jeune et de Lescheraines, nous avons décidé de comparer l'évolution de ces stations avec celle de Voglans sur la période de 1980 - 2011. Globalement, la figure 7.5 montre que pour les trois sites l'évolution des températures est quasi identique. Le fait que les intensités soient plus ou moins importantes est dû aux altitudes différentes des stations météorologiques. Les températures ont pour écart maximum 1.5°C et montrent une tendance à la hausse de $+1^{\circ}\text{C}$ en 30 ans. Entre 1980 et 1987, les valeurs de température se situent en dessous de 11.21°C pour Aillon-le-Jeune, 8.6°C pour Lescheraine et de 11.4°C pour Voglans. Après 1987, les valeurs de températures sont principalement au dessus des moyennes. Cependant, les valeurs mesurées à la station d'Aillon-le-Jeune paraissent surestimées, la station appartient à un particulier et doit être mal calibrée où avoir une position inadaptée. Néanmoins, les tendances des pentes de l'augmentation de température sont de l'ordre de 0.04 pour les trois secteurs d'étude, ce qui signifie que les données de la station d'Aillon-le-Jeune peuvent être exploitées dans le cas d'une étude de la variabilité interannuelle des températures.

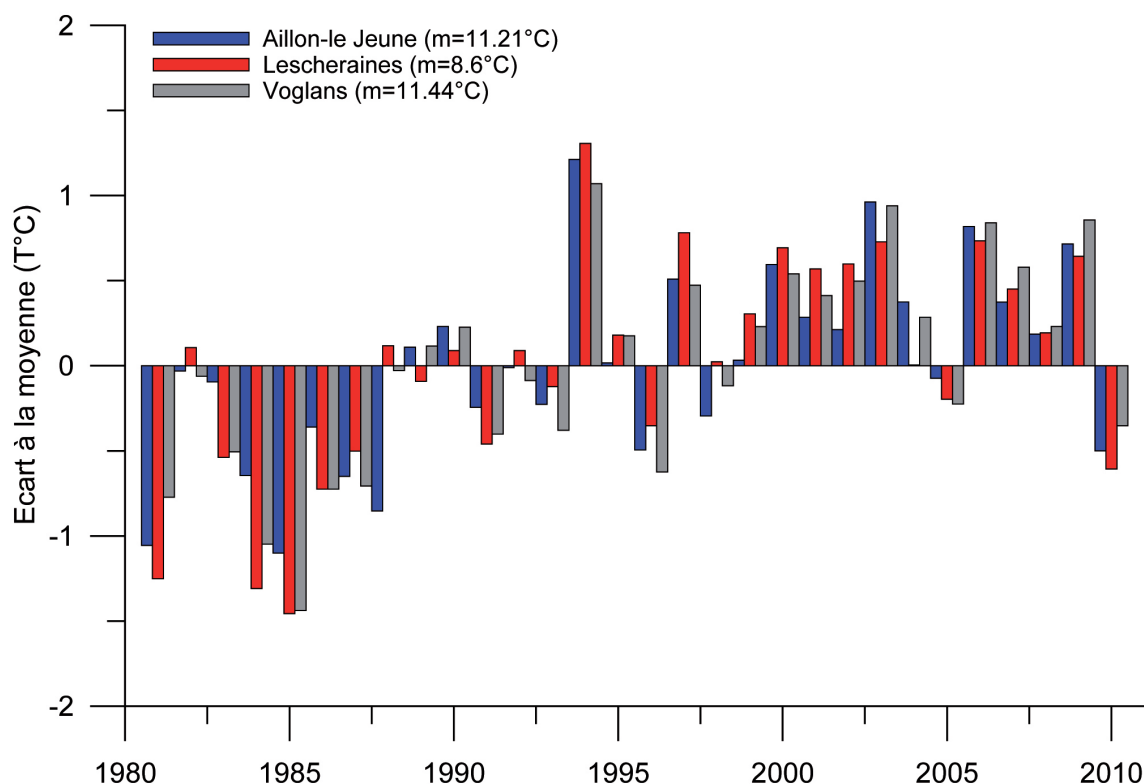


FIGURE 7.5 – Comparaison des écarts à la moyenne des températures moyennes annuelles mesurées aux stations de Aillon-le-Jeune, de Lescheraines et de Voglans (1981-2010)

2.2 Analyse de l'évolution des Précipitations

La figure 7.6 compare les écarts à la moyenne des cumuls des précipitations annuelles aux stations d'Aillon-le-Jeune et de Lescheraines sur les périodes de 1950 à 2010. La station de mesure d'Aillon-le-Jeune affiche un cumul moyen de 1947.8 mm tandis que la station de Lescheraines montre une moyenne plus faible avec 1455.5 mm. Les deux stations présentent les mêmes variations mais avec des intensités différentes et plus marquées pour Aillon-le-Jeune.

Sur la période de 1950 - 1978, nous n'observons pas de tendance particulière, l'alternance régulière des excès et déficits en eaux permet un équilibre. De 1978 à 1985, les précipitations sont particulièrement excédentaires. De 1978 à 2010, le cumul des précipitations montre une baisse significatif avec une perte de 11.7 mm par année. A partir de 2002, les cumuls des précipitations sont déficitaires par rapport à la moyenne pour les deux stations.

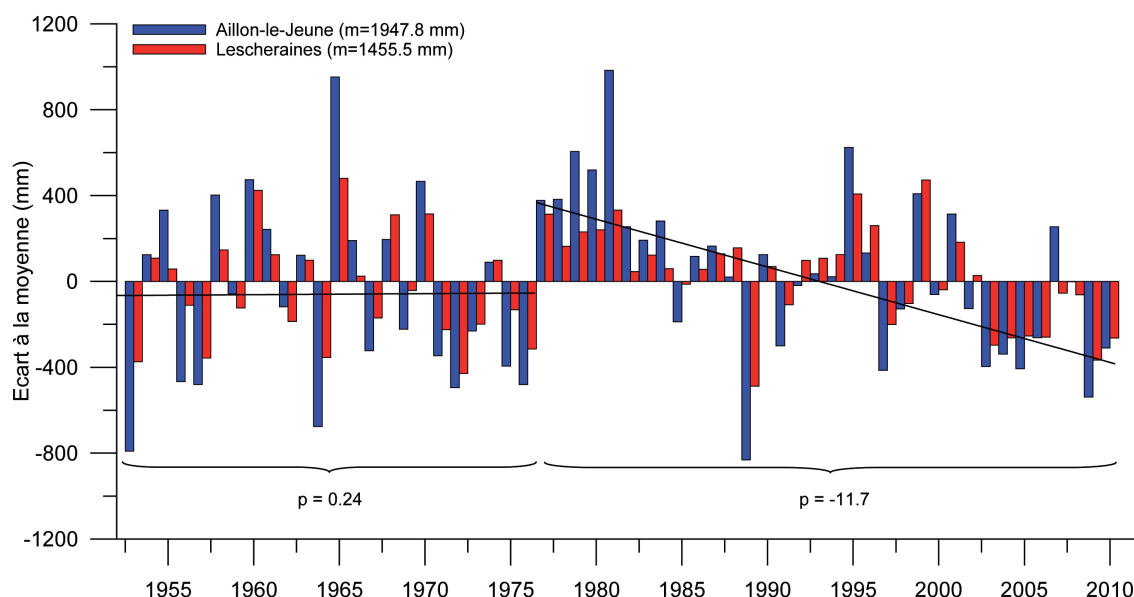


FIGURE 7.6 – Comparaison des écarts à la moyenne des précipitations moyennes annuelles mesurées aux stations de Aillon-le-Jeune et de Lescheraines (1950-2010)

Les variations annuelles et mensuelles étant similaires pour les stations d'Aillon-le-Jeune et de Lescheraines, nous avons décidé de n'exposer que les variations mensuelles des précipitations mesurées à la station de Lescheraines (Figure 7.8). Nous pouvons caractériser deux types de tendance, les mois où nous notons une augmentation des cumuls de précipitations et ceux où le cumul est en baisse.

Pour la période 1950 - 2010, les mois de Mars, Mai, Octobre et Novembre présentent une augmentation, avec une hausse particulièrement marquée pendant le mois d'Octobre (avec en moyenne +0.58°C par an). Les autres mois affichent des tendances déficitaires caractérisées surtout par les mois de Février, de Juin et de Juillet. Toutefois, les mois d'Avril, de Septembre et de Décembre montrent une assez bonne stabilité dans le cumul des précipitations. Si nous observons l'évolution globale sur tous les mois, de 1950 à 1978 il n'y a pas de réelle tendance qui se dégage, alors qu'une baisse du cumul des précipitations est notée à partir de 1978.

Nous avons vu précédemment que la fonte du couvert neigeux devrait être plus précoce au vu des augmentations des températures, si on ajoute le fait que les mois les plus déficitaires sont situés en période estivale, alors la ressource en eau devrait être impactée quantitativement et présentée des déficits importants.

2.3 Analyse de l'évapotranspiration

A l'aide de l'équation de Turc et des données de températures et de précipitations de la station météorologique de Lescheraine, nous avons pu estimer le déficit d'écoulement lié à l'évapotranspiration (Figure 7.7). Les valeurs moyennes annuelles n'ont pas été choisies en fonction d'une année civile mais en fonction d'une année hydrologique pour prendre en compte la fonte des neiges. Ainsi, les moyennes annuelles sont réalisées à partir du mois d'Aout de l'année X jusqu'au mois de Juillet de l'année X+1. Dans l'ensemble, le déficit annuel d'écoulement augmente depuis 1950, avec un gain de perte annuelle moyenne de 1 mm par an. Cependant, nous pouvons identifier, sur cette études, deux grandes tendances. La première de 1950 à 1986 présente un déficit situé sous la moyenne des 510 mm par année avec des faibles valeurs de déficits dans les années 70 (valeurs proches de 460 mm). La seconde débute en 1987 et se caractérise avec la quasi totalité des valeurs supérieure à la moyenne. Cette augmentation est essentiellement due à la hausse importante des températures et la baisse des précipitations depuis 1950. A noter que ces deux facteurs sont les deux paramètres clés de l'équation de Turc.

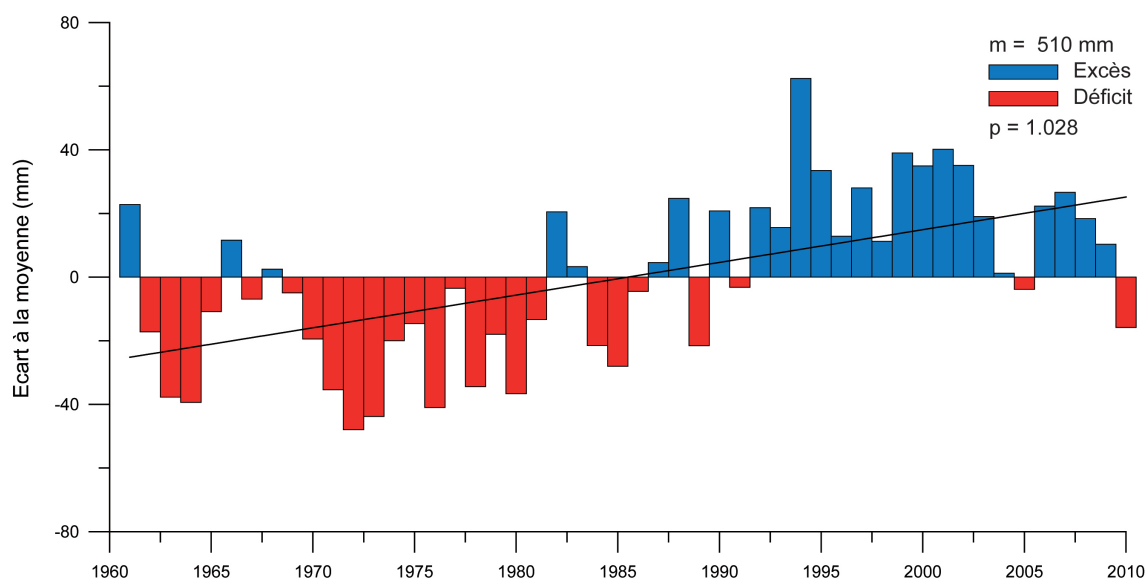


FIGURE 7.7 – Ecarts à la moyenne des déficits annuels calculés par l'équation de Turc pour les données de la station de Lescheraines (1950-2011)

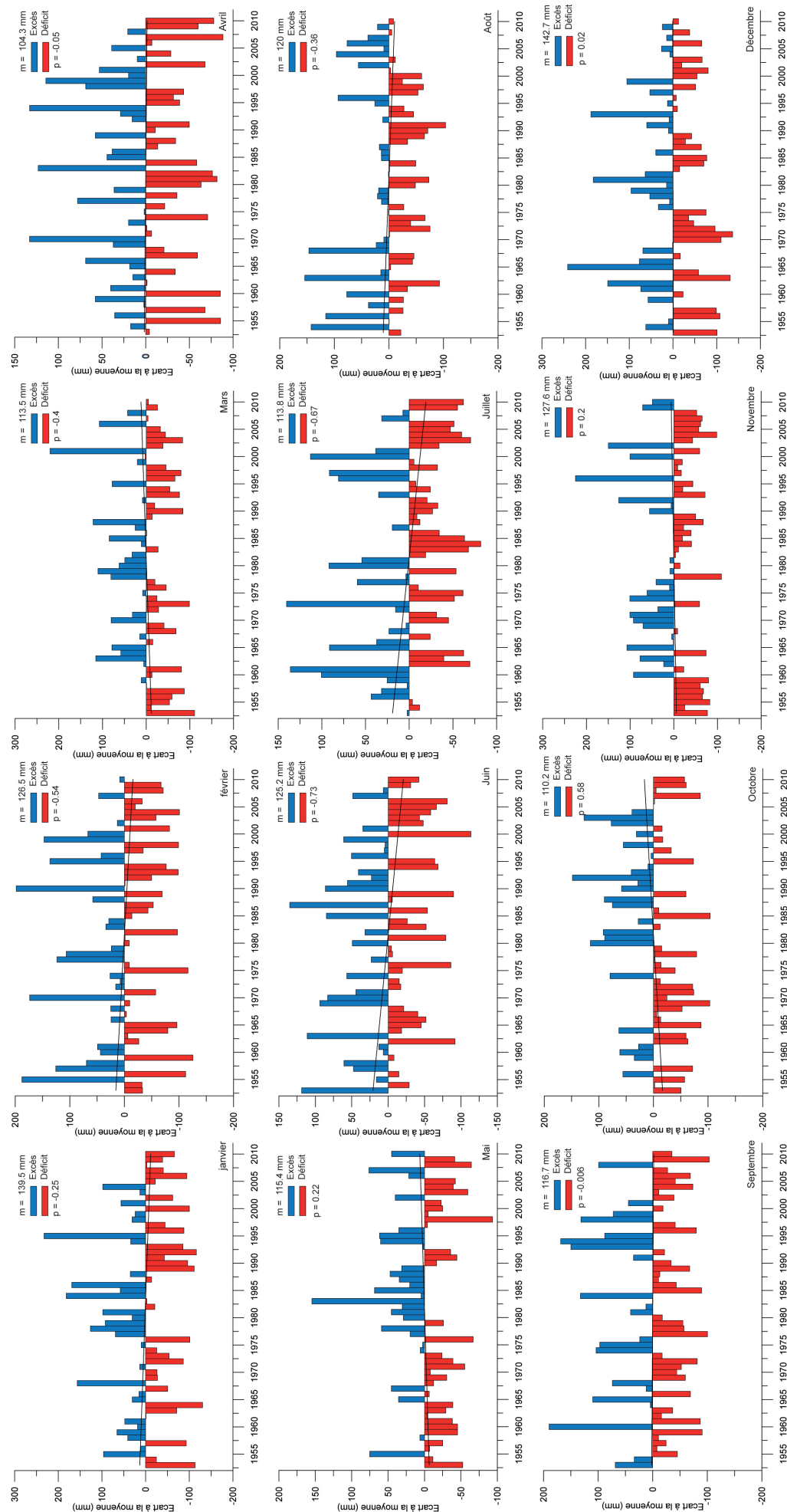


FIGURE 7.8 – Ecart à la moyenne des précipitations moyennes mensuelles mesurées à la station de Lescheraines (1950-2011)

3 Analyse de l'évolution du débit

3.1 Le Chéran à la Charniaz

Nous avons regardé le comportement des débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran à la Charniaz sur la période 1960 -2011 (Figure 7.9). Nous observons que les débits moyens les plus importants sont atteints au mois d'Avril ($12\,735\text{ L.s}^{-1}$). Ces débits importants peuvent être expliqués par la fonte du couvert neigeux qui permet l'alimentation de la rivière. Le mois d'Aout caractérise les débits les plus faibles avec $3\,250\text{ L.s}^{-1}$. La rivière présente un régime nivo-pluvial.

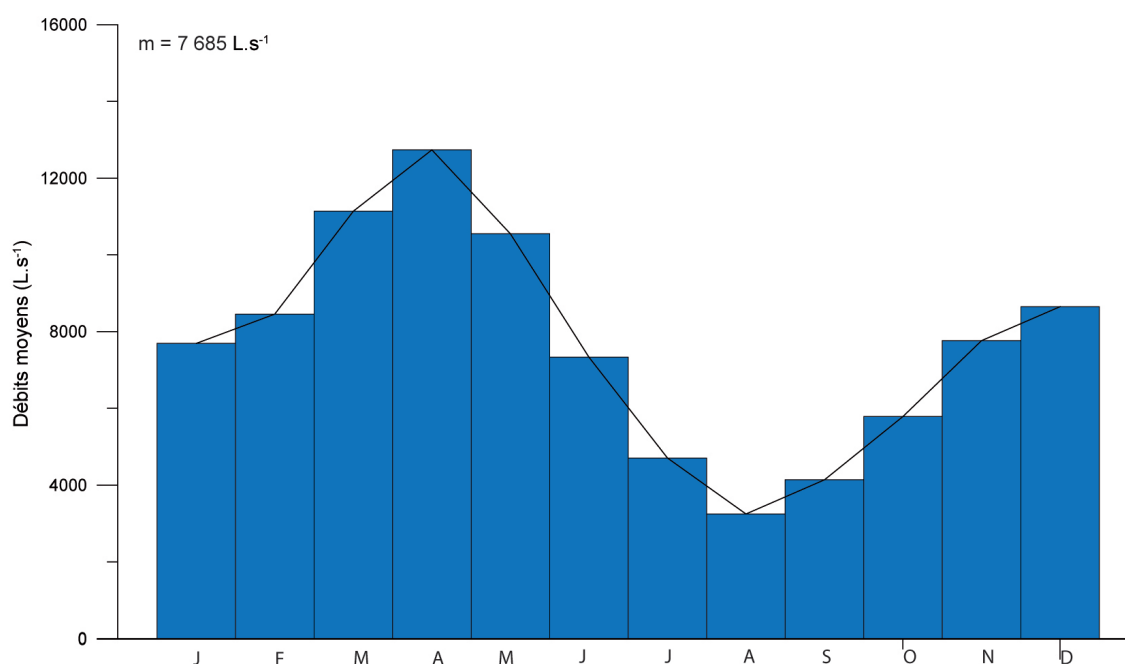


FIGURE 7.9 – Débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

La figure 7.10 montre l'écart à la moyenne des débits moyens mesurés à la station du Chéran. De façon globale, nous observons une décroissance du débit moyen de l'ordre de 40.8 L.s^{-1} par année. Cette baisse est en accord avec les tendances observées sur les précipitations. La chronique des débits peut être divisée en deux périodes, de 1960 à 1978 et de 1978 à 2011.

Sur la première période, nous notons une tendance à la baisse bien que les années excédentaires et déficitaires sont assez bien réparties. Sur la seconde période, de 1978 à 2011, la tendance à la baisse est très significative. Ces observations viennent confirmer celles décrites lors de l'analyse des précipitations.

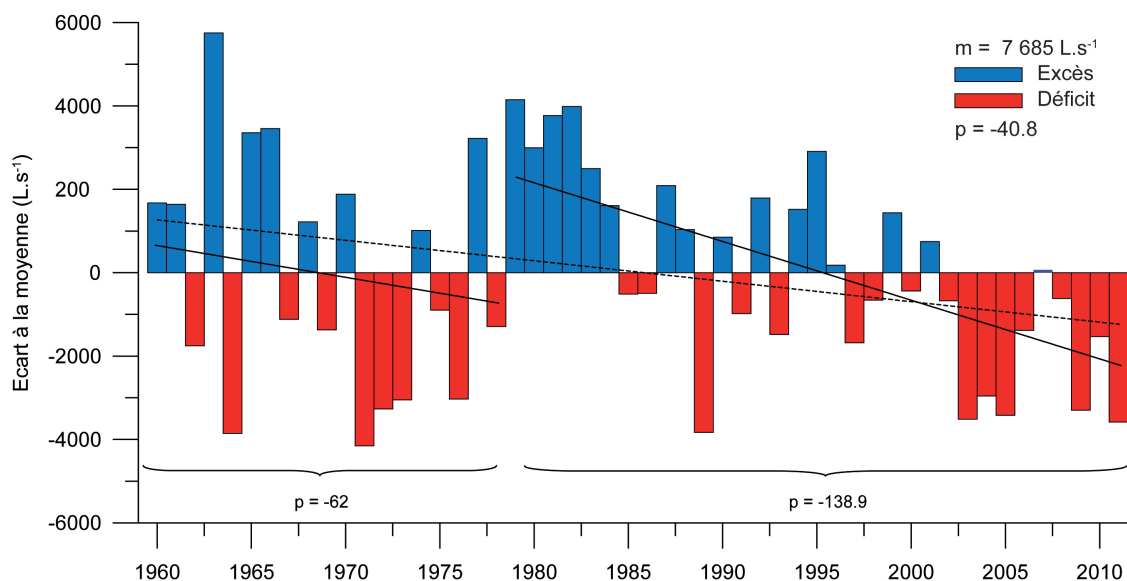


FIGURE 7.10 – Ecart à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

La figure 7.11 présente l'écart à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station de jaugeage du Chéran. Il correspond au débit mensuel minimal ayant une probabilité de 1 sur 5 de ne pas être dépassé une année donnée. Nous observons de façon annuelle une tendance à la baisse. Cela signifie que la valeur du débit moyen annuel le plus sec revenant en moyenne tous les 5 ans est de plus en plus basse, les étiages sont donc plus prononcés. La baisse du Q_{mna_5} est de 15.2 L.s^{-1} par année.

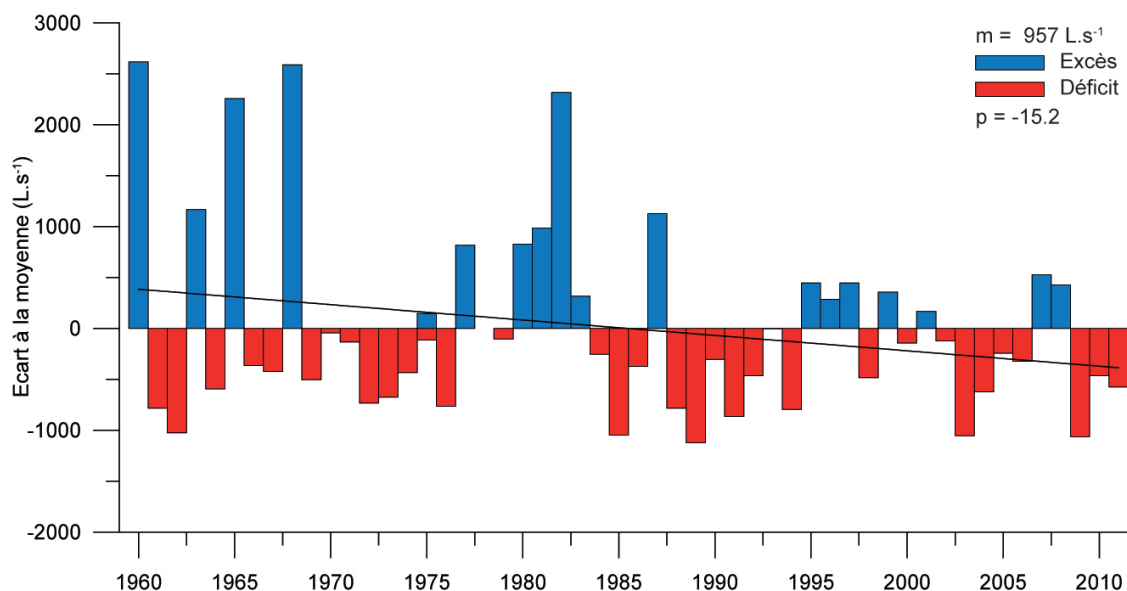


FIGURE 7.11 – Ecart à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

Les écarts à la moyenne du débit instantané maximal annuel de la rivière du Chéran sont présentés figure 7.12. La tendance globale des débits instantanés est à la baisse et particulièrement marquée à partir de 1998. Cette observation permet de

dire que les précipitations dites "extrêmes" n'affichent pas des valeurs d'intensités importantes. Le débit instantané maximal annuel baisse de 266.9 L.s^{-1} par année.

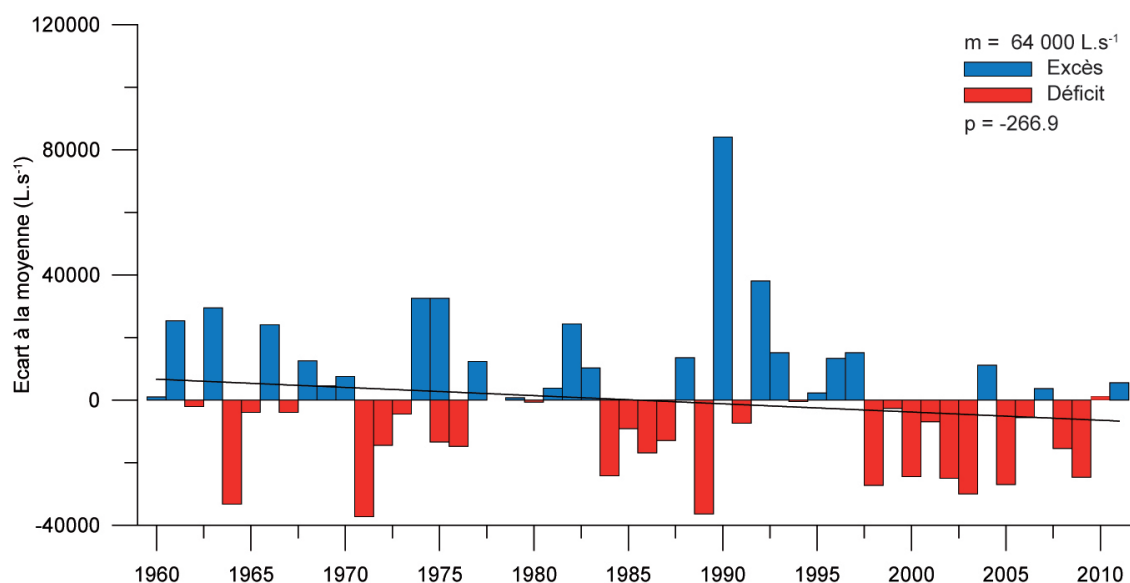


FIGURE 7.12 – Ecart à la moyenne du débit instantané maximal annuel mesuré à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

La figure 7.13 expose les écarts à la moyenne des débits minimums instantanés mesurés à la station du Chéran de 1960 à 2011. La tendance générale montre une baisse des débits minimums. Les récessions de la rivière sont donc plus importantes. Ce phénomène pourrait être expliqué par deux hypothèses. La première serait que la fonte du couvert neigeux est plus précoce, ne permettant plus une alimentation en eau lors des périodes estivales. La seconde hypothèse serait qu'avec une augmentation des températures, l'évapotranspiration de la végétation est plus importante. Ces deux explications ne sont pas exclusives et peuvent se combiner.

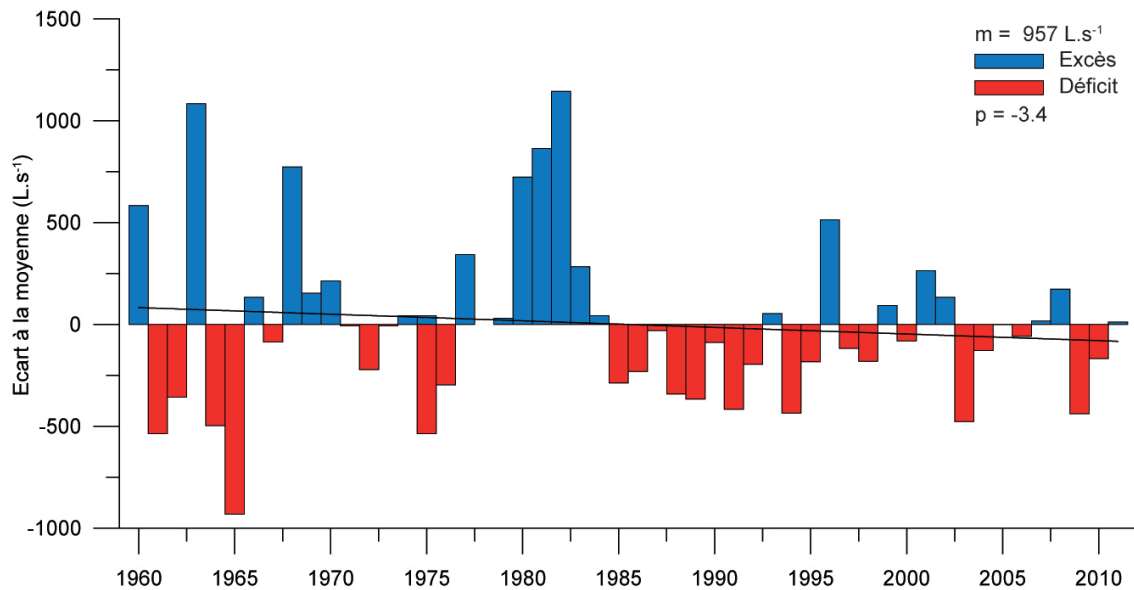


FIGURE 7.13 – Ecart à la moyenne du débit instantané minimal annuel mesuré à la station du Chérans à la Charniaz (1960-2011)

La figure 7.14 présente l'écart à la moyenne des débits moyens mensuels mesurés à la station du Chérans sur la période 1960 - 2011. Nous observons que du mois de Février au mois de Novembre, les débits sont en baisses. Les mois les plus déficitaires sont Avril et Mai. Ils possèdent des pentes de droite de tendance respectivement de - 110.26 et -94.35. Nous avons observé précédemment que ces deux mois correspondaient à une période où les précipitations montraient les baisses les plus importantes.

Les mois de Mars, d'Octobre et de Décembre affichent les pentes les plus faibles avec respectivement -6.725, -1.3 et 1.256. Les trois mois ne montrent donc pas de variations significatives.

Enfin, le mois de Janvier présente une augmentation significative des débits avec un gain général de 16.97 L.s^{-1} par année. Cette augmentation est en accord avec la légère hausse des températures qui entrainerait plus de précipitations au détriment de la neige par une augmentation de l'altitude de la ligne de partage pluie/neige.

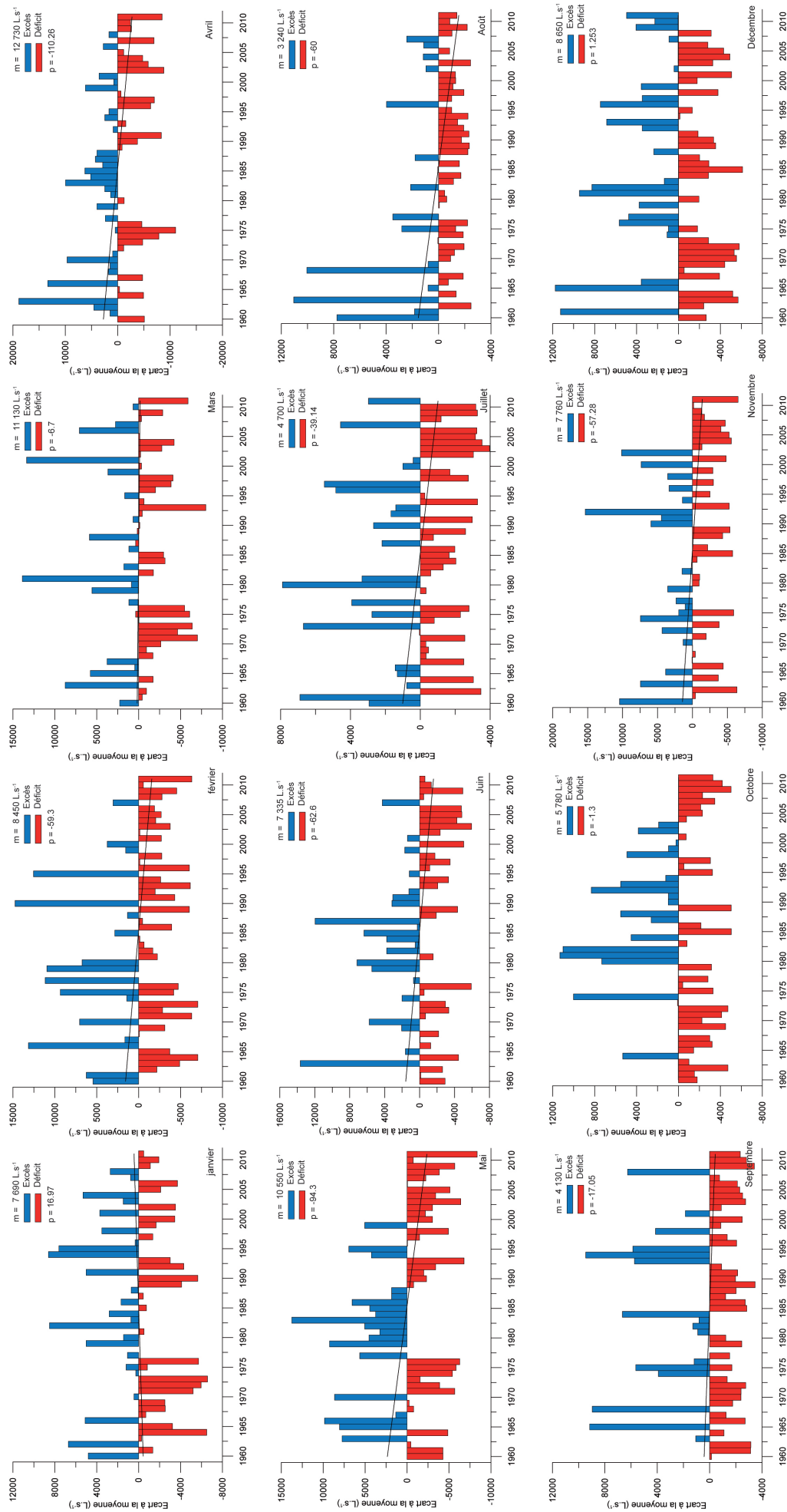


FIGURE 7.14 – Ecart à la moyenne des débits moyens mensuels mesurés à la station du Chéran (1960-2011)

Nous nous sommes également intéressés aux fréquences moyennes des crues (Figure 7.15). Pour cela, nous avons calculé la valeur seuil de crue sur la période 1960-2011 sur le site du Chéran. Tous les pics de crue dépassant $38\,370\text{ L.s}^{-1}$ et séparés d'un intervalle de cinq jours d'une crue passée ont été retenus. Globalement, la tendance est à la baisse, de 1960 à 1983, le nombre des crues varie dans l'ensemble entre 3 et 5 par an. À partir de 1984, le nombre de crue diminue pour varier entre 1 et 3 par année.

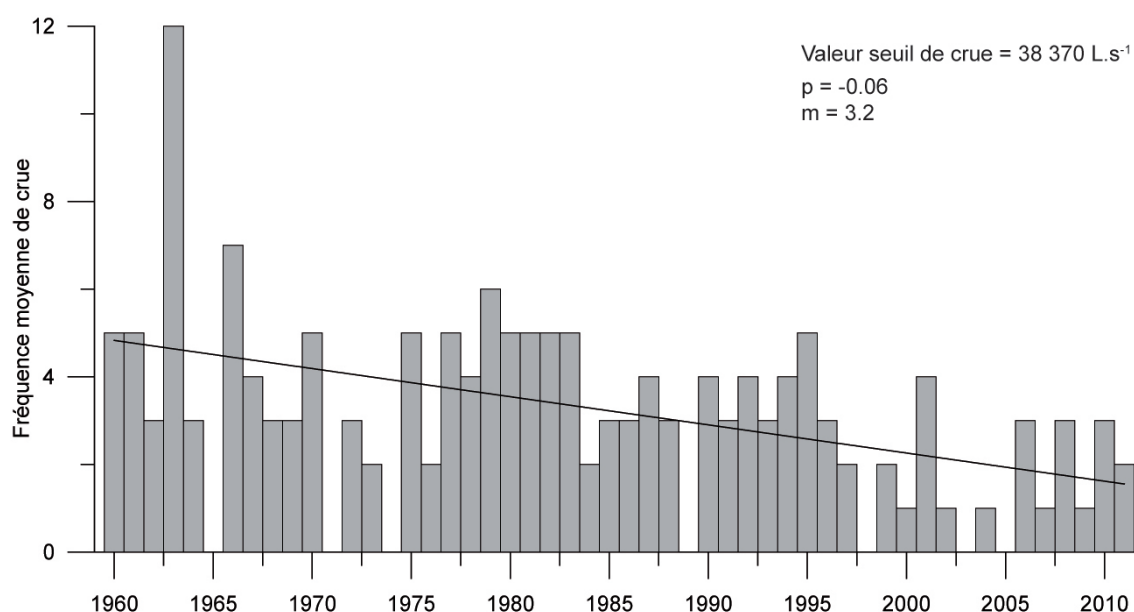


FIGURE 7.15 – Fréquence annuelle des crues mesurées à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

La figure 7.16 présente le nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ estimé à $1\,130\text{ L.s}^{-1}$. La pente de la droite de tendance est de -0.0003 , donc non significative pour exprimer une évolution. Toutefois, nous pouvons diviser la chronique en deux périodes : de 1960 à 1980 puis de 1980 à 2011. La première période est marquée par un nombre de jours consécutifs en baisse passant de 40 à 10 jours. Pendant cette période la durée des étiages diminuent, ils sont régulièrement coupés par des précipitations. De 1980 à 2011, le nombre de jours varie mais la tendance ne montre pas d'oscillations. Le nombre moyen de jours d'étiage consécutifs est d'environ 10 jours.

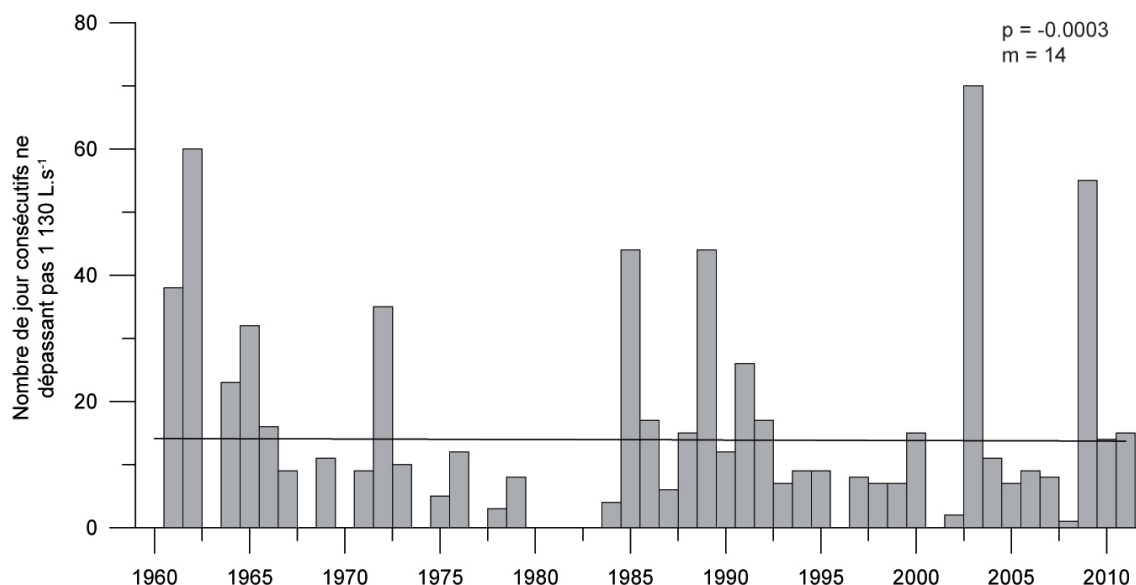


FIGURE 7.16 – Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

Suite à cette analyse, nous avons observé le nombre de jours total au cours d'une année ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ estimé à 130 L.s^{-1} (Figure 7.17). La pente de la droite de tendance est de -1.18 , donc non significative pour exprimer une évolution. Comme pour l'analyse précédente, nous avons divisé la chronique en deux périodes : de 1960 à 1980 puis de 1980 à 2011. La première période montre une tendance à la baisse avec un nombre de jours passant de 120 à 10 jours. Sur la seconde période, de 1980 à 2011, le nombre de jours varie mais la tendance est à l'équilibre avec un nombre moyen de jours d'étiage est d'environ 20 jours.

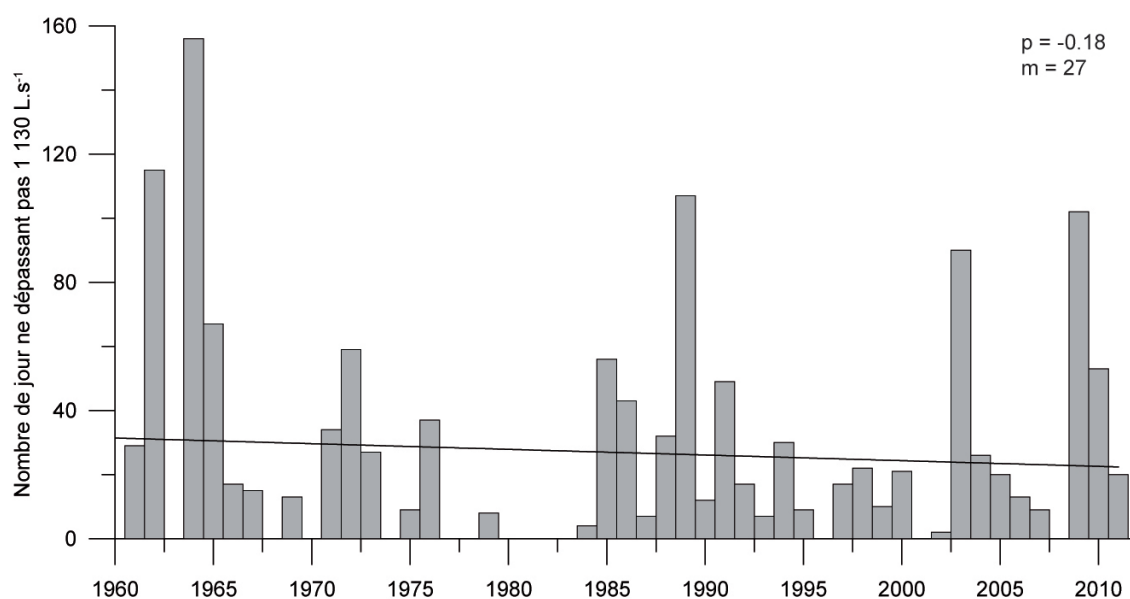


FIGURE 7.17 – Nombre de jours ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

Nous avons réalisé une analyse corrélatrice simple des débits sur les données du

Chéran (Figure 7.18) afin de vérifier si la régulation du stockage d'eau est homogène sur la période 1960 - 2011. Cette analyse est possible car une forte part des eaux du Chéran provient d'alimentation karstique. Nous observons que sur les 51 ans d'analyse la pente de la droite de tendance est horizontale avec une valeur de -0.0069. Cependant, de 1960 à 1980, l'effet mémoire est en baisse passant de 30 à 8 jours en moyenne. Le système était donc moins bien régulé. De 1980 à 2011, le système s'équilibre et la régulation des réserves en eau est stable avec un effet mémoire de 10 jours.

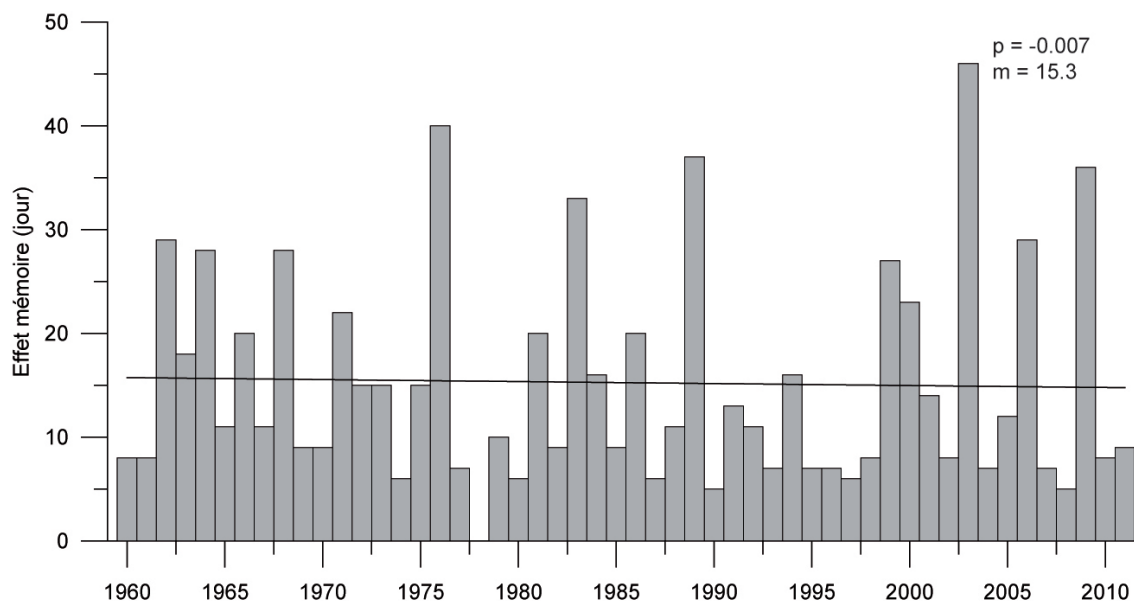


FIGURE 7.18 – Coefficient de corrélation annuel calculé à la station du Chéran (1960-2011)

Nous avons cherché la date du premier pic de crue provoqué par le début de la fusion massive printanière (Figure 7.19) dans le but de vérifier s'il existait bien une précocité du phénomène. Dans l'ensemble, nous notons une avancée de la date de la fusion du stock de neige. Ce pic de crue passe du 150^e jour au 120^e jour, soit une avancée de 1 mois. La fonte qui commençait fin Mai dans les années 1960, débute maintenant fin Avril. Ce résultat est validé par l'augmentation des températures sur ces deux mois.

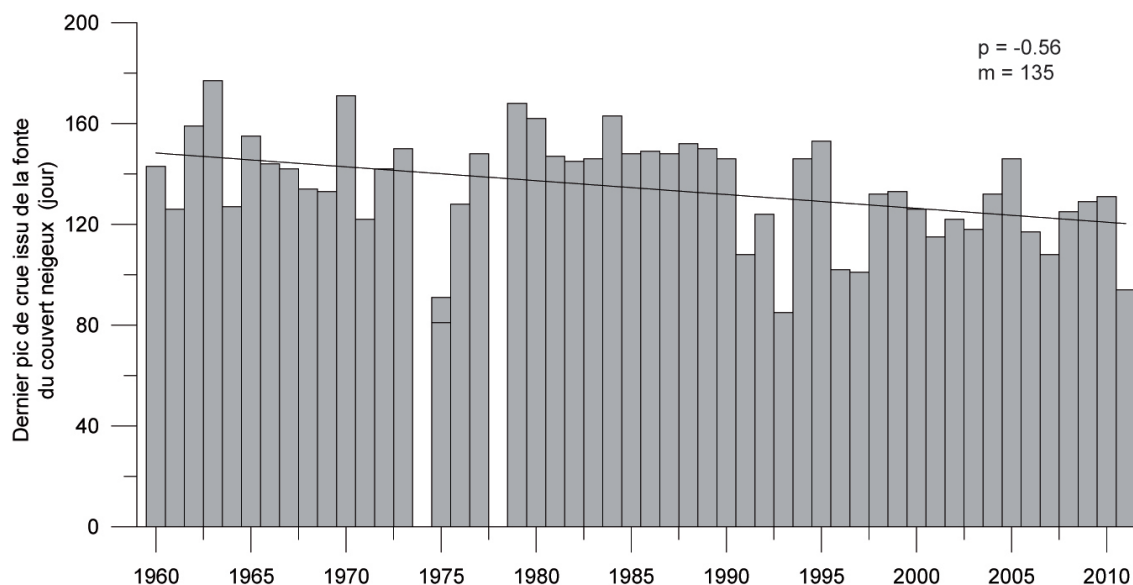


FIGURE 7.19 – Date du premier pic de crue marquant de la fusion printanière à la station du Chéran à la Charniaz (1960-2011)

3.2 Station hydrométrique du Groin à Artemare

Nous avons regardé le comportement des débits moyens mensuels mesurés à la station du Groin à Artemare sur la période 1960 -2011 (Figure 7.20). Nous observons que le graphique présente deux pics de débit, le premier atteint au mois d'Avril (environ $5\,000\text{ L.s}^{-1}$) et le second au mois de Juillet ($5\,800\text{ L.s}^{-1}$). Comme pour la rivière du Chéran, les débits du mois d'Avril peuvent s'expliquer par la fonte du couvert neigeux permettant l'alimentation de la rivière. Le deuxième pic de débits du mois de Juillet et plus difficile à appréhender. En effet, le mois de Juillet est généralement sec, il ne présente pas les cumuls de pluie les plus importants. L'origine de ces débits pourrait être expliquée par des précipitations locales (orages).

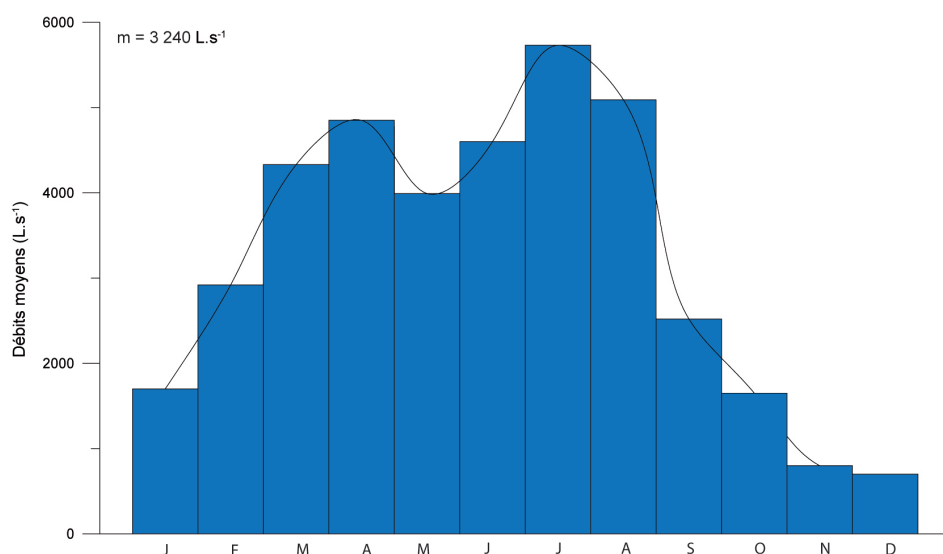


FIGURE 7.20 – Débits moyens mensuels mesurés à la station du Groin (1961-2011)

La figure 7.21 montre l'écart à la moyenne des débits moyens mesurés à la station du Groin. De façon globale nous observons une décroissance de l'ordre de 20.9 L.s^{-1} par année. Cette baisse est en accord avec les tendances observées lors de l'étude des précipitations. La chronique des débits peut être divisée en deux périodes, de 1960 à 1975 et de 1975 à 2011.

Sur la première période, nous notons que de 1966 à 1975, les débits sont marqués par une forte diminution. La seconde période débute en affichant des années avec des débits excédentaires, puis à partir des années 80 jusqu'en 2011 la tendance montre une baisse très significative. Ces observations viennent confirmer, elles aussi, celles décrites lors de l'analyse des précipitations mais en débutant plus précocement que pour le Chéran.

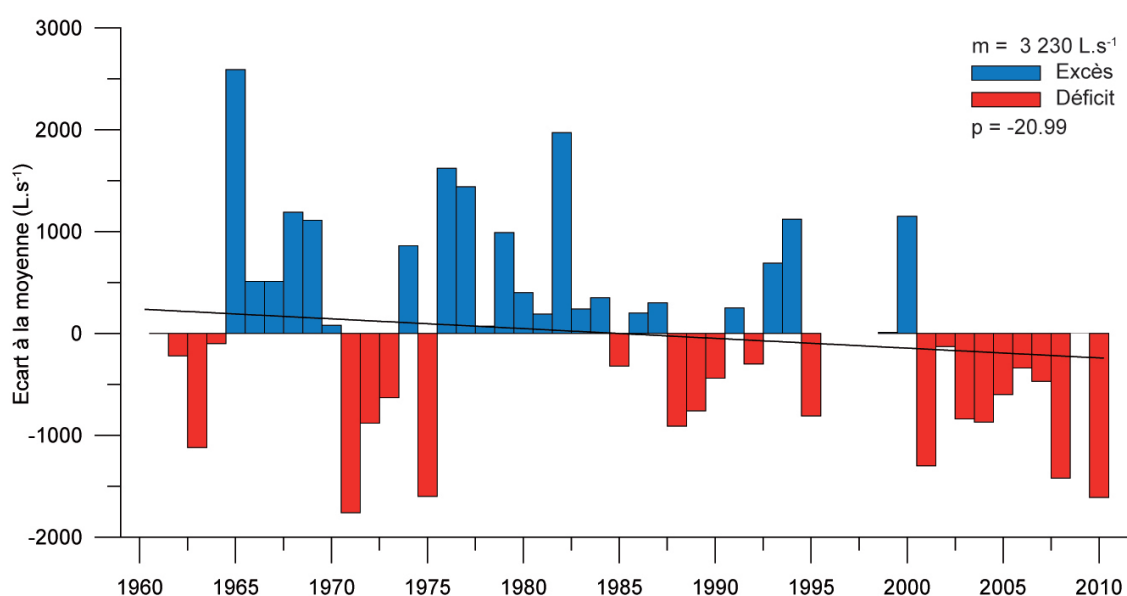


FIGURE 7.21 – Ecart à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la station du Groin (1961-2011)

La figure 7.22 présente l'écart à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station de jaugeage du Groin. Il correspond au débit mensuel minimal ayant une probabilité de 1 sur 5 de ne pas être dépassé une année donnée. Nous observons, de façon annuelle, une tendance à la baisse avec une valeur de pente de -3.34. Cela signifie que la valeur du débit moyen annuel le plus sec revenant tous les 5 ans est de plus en plus basse, les étiages sont donc plus prononcés. Cependant, si l'on supprimait les quatre années très excédentaires (1963, 1965, 1980 et 2007), le Q_{mna_5} serait homogène sur toute la période d'étude. A noter qu'il n'existe pas de période très déficitaire.

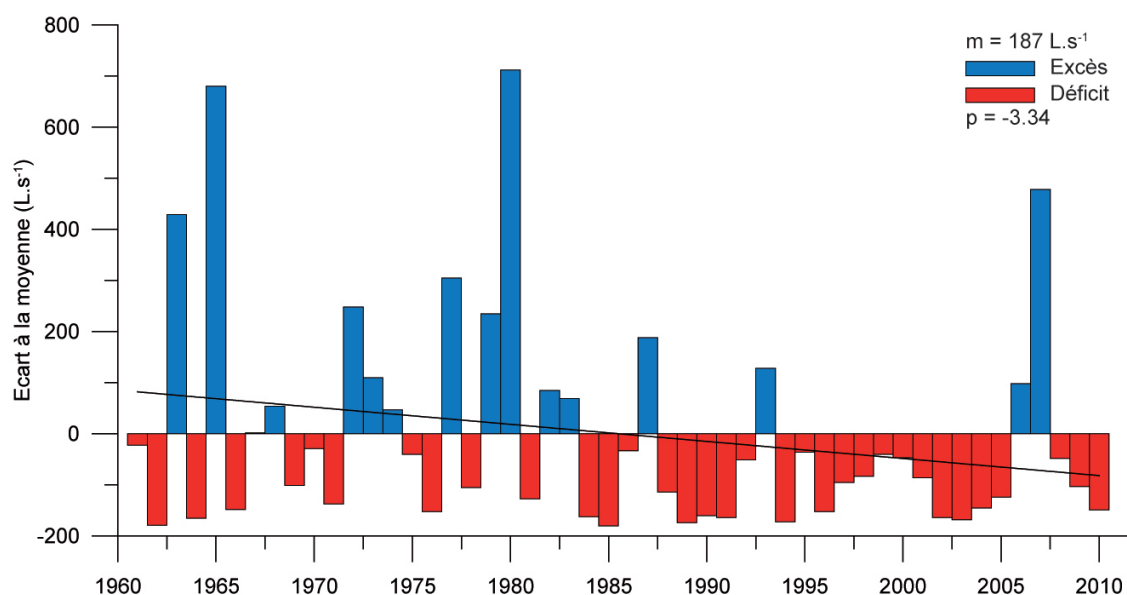


FIGURE 7.22 – Ecart à la moyenne du Q_{mna_5} mesuré à la station du Groin (1961-2011)

Les écarts à la moyenne du débit instantané maximal annuel de la station du Groin sont présentés figure 7.23. La tendance globale des débits instantanés maximums est à la baisse, la pente de la droite est de -156.34. Ce graphique peut se diviser en trois périodes. La première, de 1967 à 1977, montre une baisse significative du débit instantané maximal (passant de 50 000 à 32 000 $L.s^{-1}$). Sur la période 1977 - 1989, les débits fluctuent mais ne présentent pas de tendance à la baisse ou à la hausse. La dernière période est caractérisée par une crue "extrême" possédant un débit de 92 450 $L.s^{-1}$, la tendance devient ensuite à la baisse car à partir de 1992, la quasi totalité des valeurs se situent sous la moyenne de 37 450 $L.s^{-1}$.

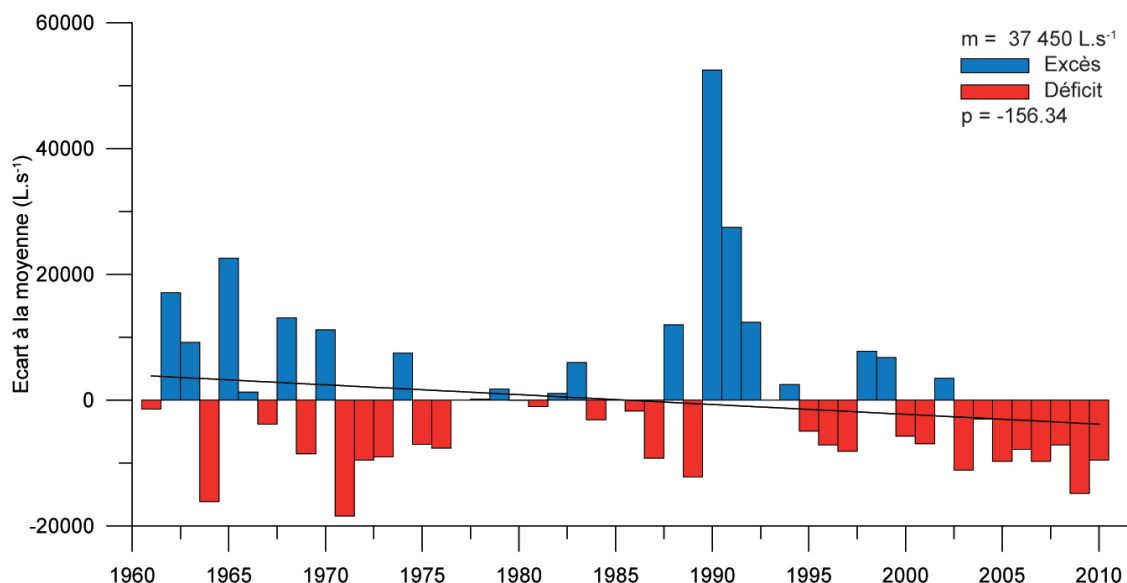


FIGURE 7.23 – Ecart à la moyenne du débit instantané maximal mesuré à la station du Groin (1961-2011)

La figure 7.24 expose les écarts à la moyenne des débits minimums instantanés mesurés à la station de la source du Groin de 1961 à 2011. La tendance générale montre une baisse des débits minimums avec une pente de la droite de tendance de -0.35 . Les récessions de la rivière sont donc plus importantes, sauf pour la période 1967 - 1979, où les récessions sont moins marquées et peuvent atteindre les 80 L.s^{-1} alors que la moyenne est de 21.7 L.s^{-1} . Comme pour le Chéran, la baisse générale pourrait être expliquée par une fonte plus précoce du couvert neigeux, ne permettant plus une alimentation en eau lors des périodes estivales. L'augmentation des températures peut avoir un effet sur l'évapotranspiration liée à la végétation entraînant sa hausse.

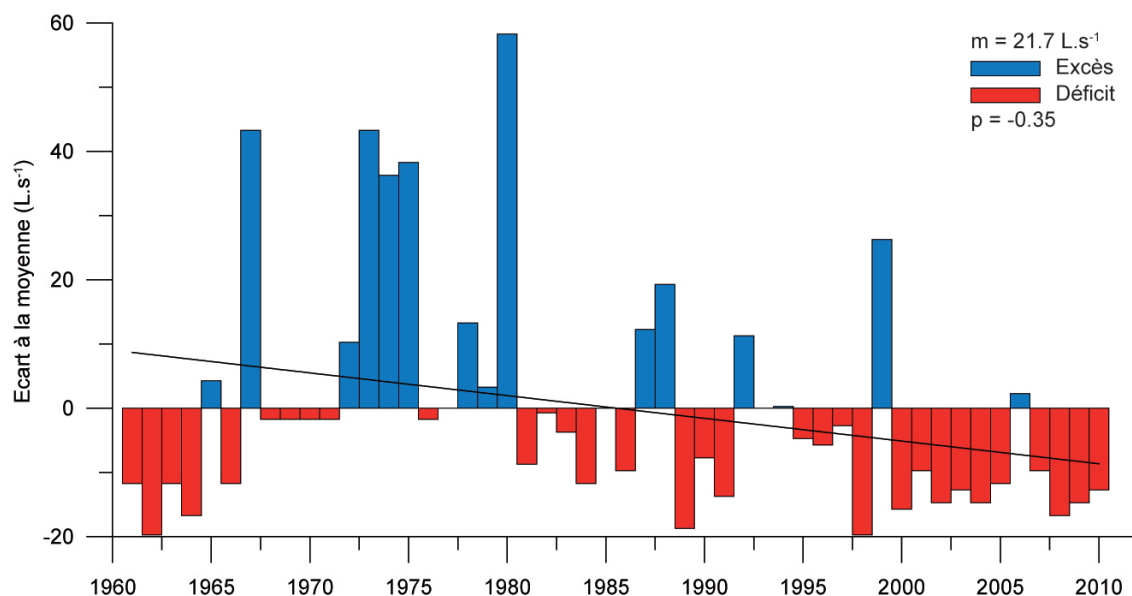


FIGURE 7.24 – Ecart à la moyenne du débit instantané minimal mesuré à la station de la source du Groin (1961-2011)

La figure 7.25 présente l'écart à la moyenne des débits moyens mensuels mesurés à la station du Groin sur la période 1960 - 2011. Nous observons qu'hormis les mois de Janvier, de Juillet et d'Octobre, les débits sont en baisse. Les mois les plus déficitaires sont Février, Mars, Avril et Mai, ils possèdent des pentes de droite de tendance respectivement de -32.33, -44.9, -64.8 et -32.04. Nous avons observé précédemment que ces quatre mois correspondent à une période où la tendance des précipitations était à la baisse.

Les mois de Janvier, de Juillet et d'Octobre présentent des augmentations plus ou moins significatives avec des gains annuels moyens respectifs de 13.9, 5.09 et 8.57 L.s⁻¹.

L'augmentation des débits moyens du mois de Janvier est en accord avec la légère hausse des températures qui entrainerait plus de pluie au détriment de la neige. La hausse du débit du mois d'Octobre peut s'expliquer par une augmentation moyenne des précipitations sur la période. Enfin, le gain de débits pendant le mois de Juillet peut être expliqué par deux hypothèses. La première serait que le domaine jurassien, plus exposé aux précipitations venant d'un flux Ouest que les Préalpes, connaîtrait un plus grand nombre de phénomènes d'averse localisée. La deuxième serait que la forêt du bassin versant de la source ait été coupée et/ou modifiée entrainant une baisse du phénomène d'évapotranspiration.

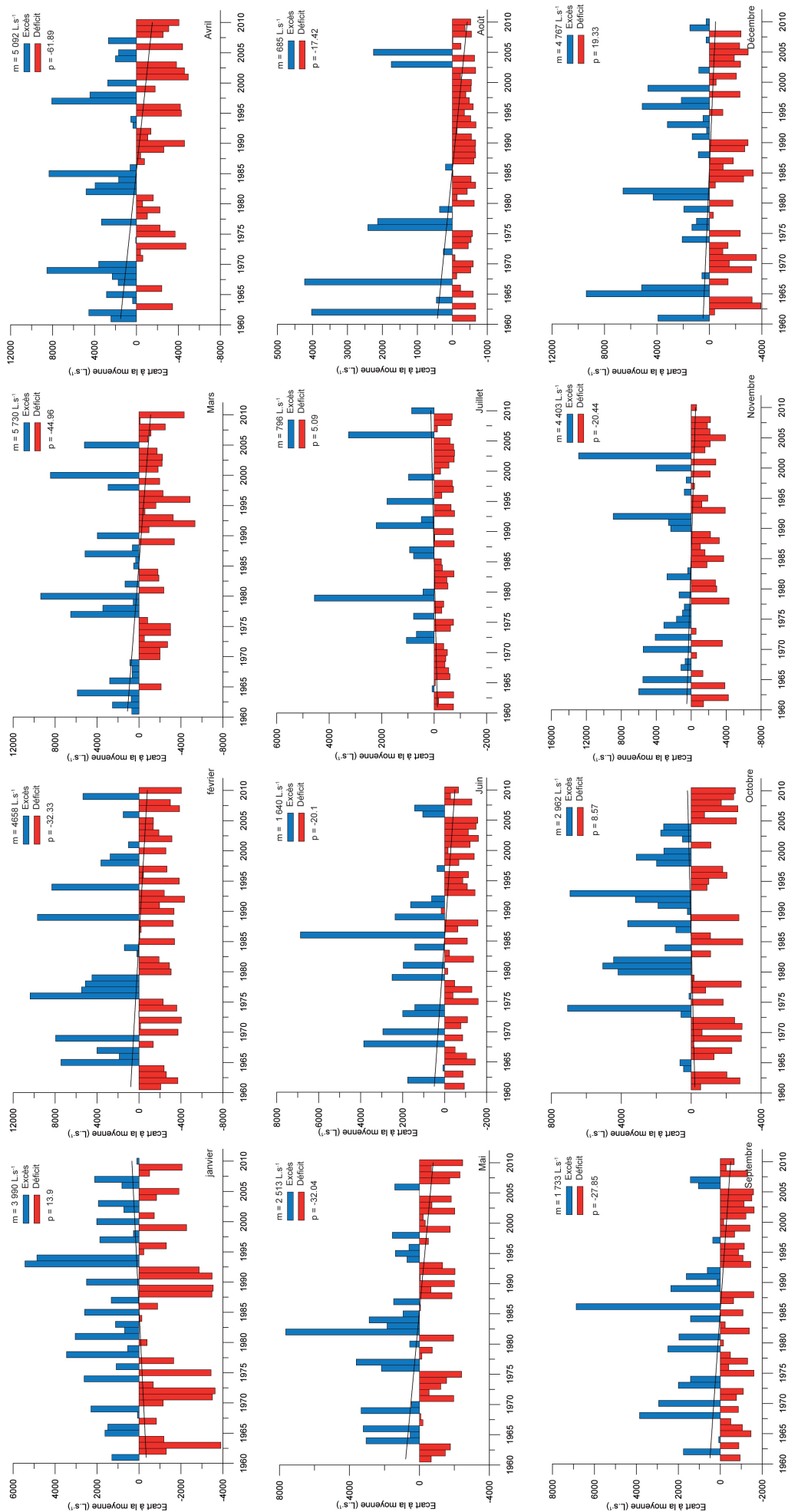


FIGURE 7.25 – Ecart à la moyenne des débit moyen mensuel mesuré à la station du Groin (1961-2011)

Les fréquences moyennes des crues sont présentées figure 7.26, pour cela, nous avons calculé la valeur seuil de crue sur la période 1961-2011 sur le site de la station du Groin. La valeur seuil de crue calculée sur la période est de $22\,460\text{ L.s}^{-1}$, tous les pics de crue dépassant cette valeur et espacés d'un intervalle de cinq jours ont été dénombrés. Nous observons une assez bonne régularité dans le nombre de pic annuel variant entre 5 et 6. L'année 1999 est particulièrement prolifique avec une dizaine de crues recensées. A partir de 2003, le nombre de crues dépassant le seuil chute oscillant entre 1 à 2 crues par année. Dans la globalité, le nombre de crues diminue.

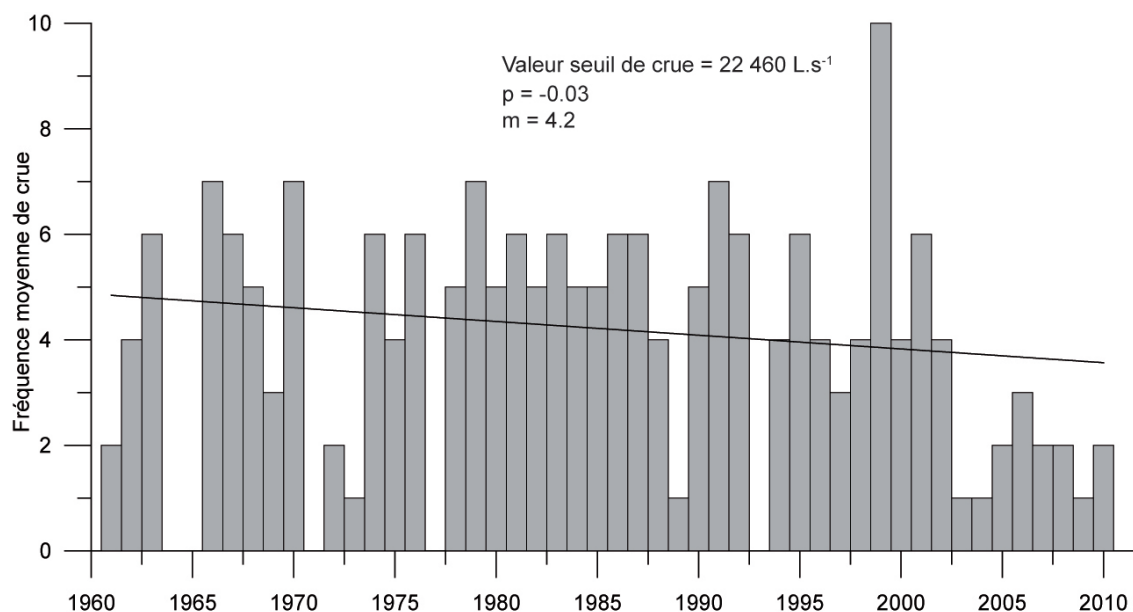


FIGURE 7.26 – Fréquence des crues mesurées à la station du Groin (1961-2011)

Le nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ estimé à 39.38 L.s^{-1} est présenté figure 7.27. La pente de la droite de tendance est de 0.12. Nous observons une augmentation de la durée des périodes d'étiage qui traduit une augmentation des périodes sèches sans apport de pluie. Plus simplement, les pluies efficaces permettant une augmentation des débits seraient donc plus rares.

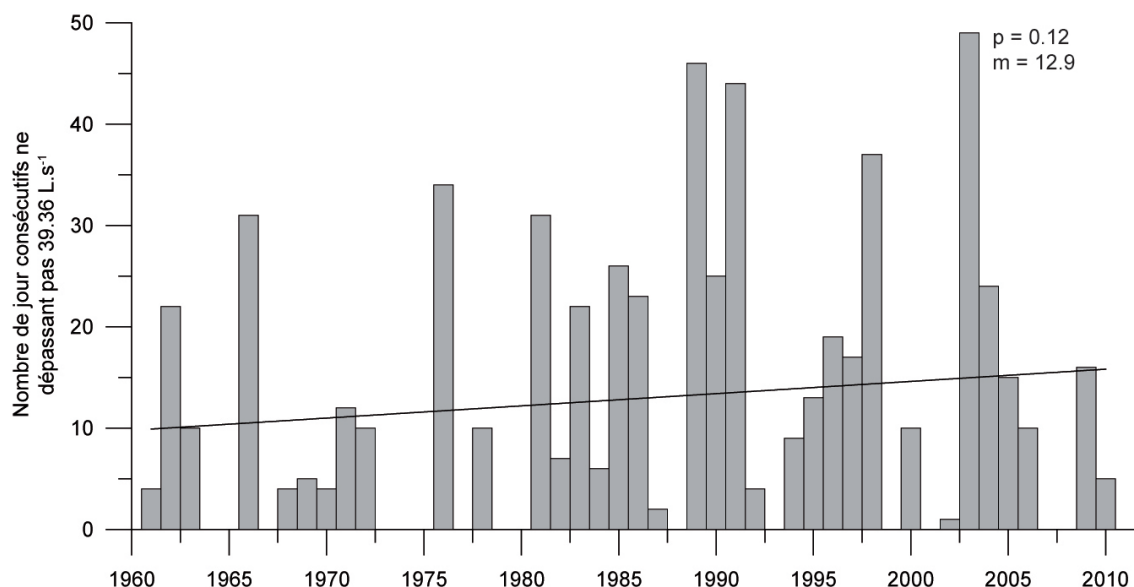


FIGURE 7.27 – Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le Vcn(10) mesuré à la station du Groin (1961-2011)

Suite à cette analyse, nous avons observé le nombre de jour total au cours d'une année ne dépassant pas le Vcn(10) estimé à 39.36 L.s⁻¹ (Figure 7.28). La pente de la droite de tendance est de 0.34. Le nombre total de jour est lui aussi en augmentation. L'année 1989 est particulièrement sèche, le Vcn(10) n'est pas dépassé pendant 150 jours.

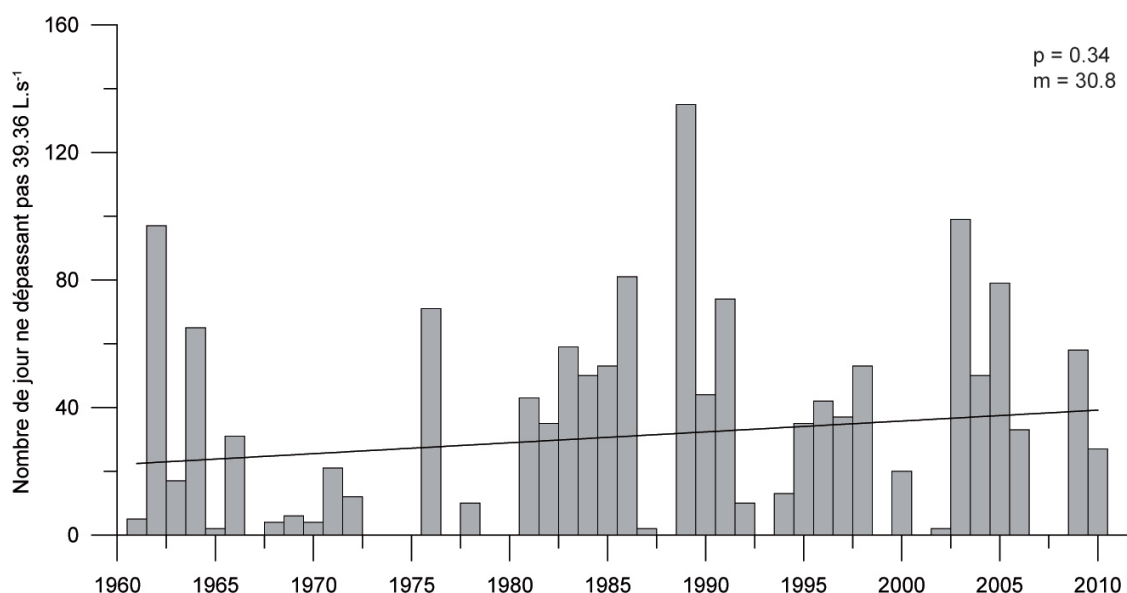


FIGURE 7.28 – Nombre de jours total ne dépassant pas le Vcn(10) mesuré à la station du Groin (1961-2011)

Nous avons réalisé une analyse corrélatrice simple des débits sur les données de la station du Groin (Figure 7.29) afin de vérifier si la régulation du stockage d'eau est homogène sur la période 1960 - 2011. Nous observons que sur les 51 ans d'analyse la pente de la droite de tendance présente une baisse avec une valeur de -0.079. L'effet

mémoire passe de 13 à 9 jours en moyenne. Le système était donc moins bien régulé. Toutefois depuis 1993, le stockage en eau paraît mieux régulé.

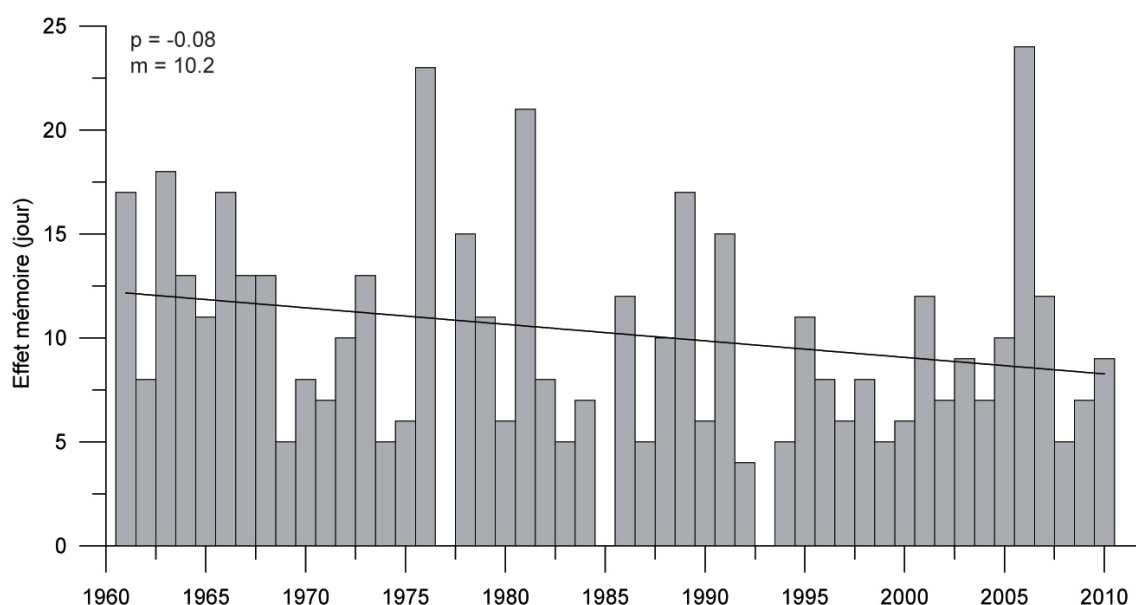


FIGURE 7.29 – Coefficient de corrélation annuel calculé à la station de la source du Groin (1961-2011)

Nous avons cherché la date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière (Figure 7.30) dans le but de vérifier s'il existait bien une précocité du phénomène. Dans l'ensemble, nous notons une avancée de la date de la fusion du stock de neige. Le pic de crue passe du 120^e jour au 100^e jour, soit une avancée de moins d'un mois. La fonte qui commençait fin Avril dans les années 60, débute au commencement du mois. Ce résultat est validé par l'augmentation des températures sur les deux mois.

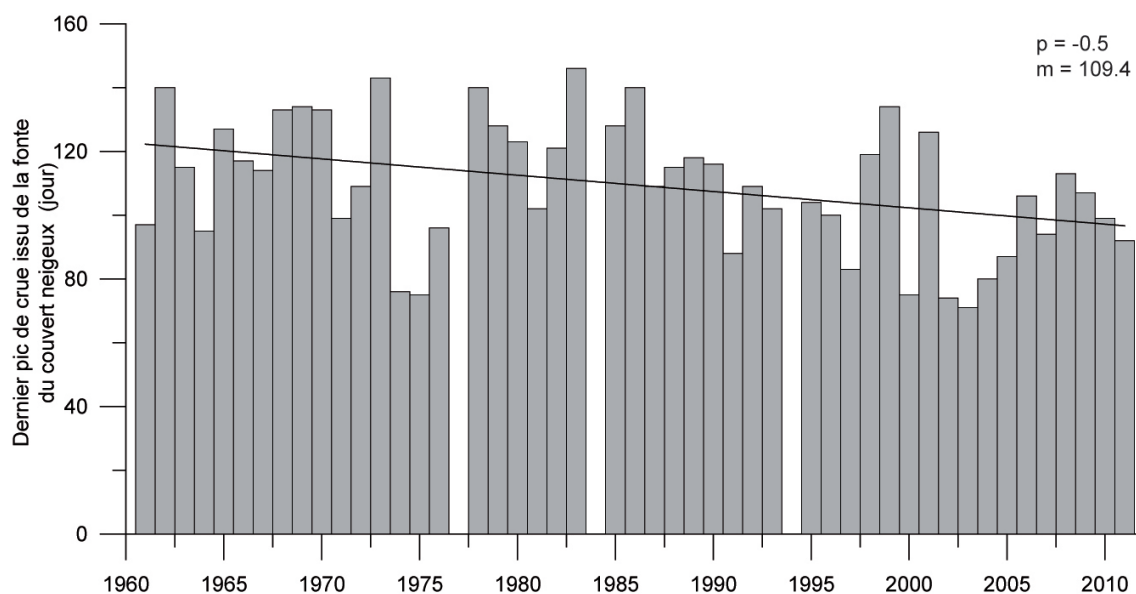


FIGURE 7.30 – Date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière à la station du Groin (1961-2011)

3.3 Bange - l'Eau Morte

Les débits moyens mensuels de la source de Bange - l'Eau Morte (Figure 7.31) ont une répartition similaire aux débits mesurés à la station du Chéran. Le mois d'Avril représente le mois où les débits sont les plus importants (650 L.s^{-1}) alors que le mois d'Aout présente les débits les plus faibles (environ 100 L.s^{-1}). La source possède un régime nivo-pluvial.

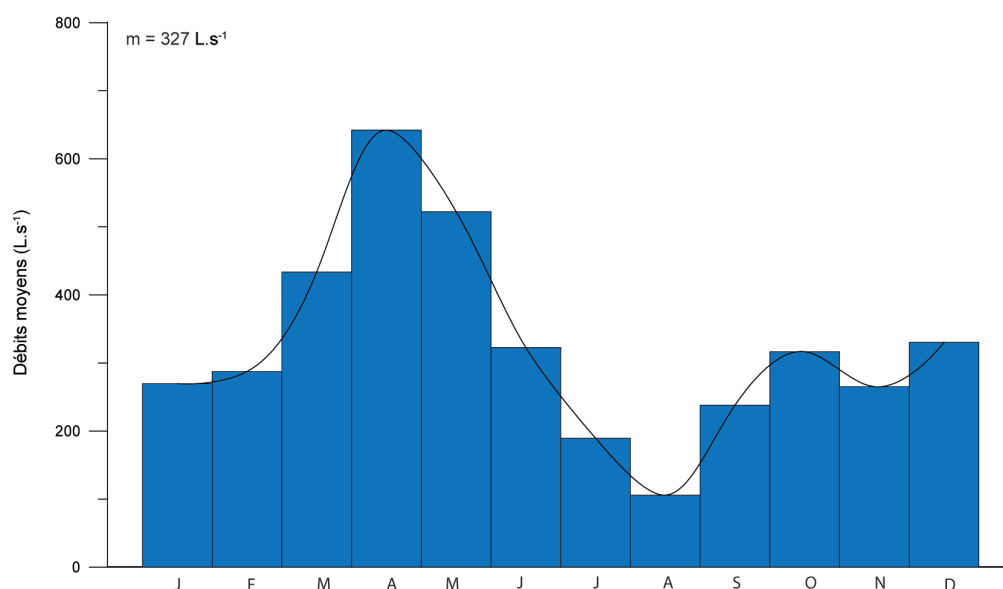


FIGURE 7.31 – Débits moyens mensuels mesurés à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

La figure 7.32 présente l'écart à la moyenne des débits moyens mesurés à l'exutoire de la source de Bange - l'Eau Morte. De façon globale, nous observons une décroissance de l'ordre de 2.3 L.s^{-1} par année. Cette baisse est en accord avec les tendances observées par l'analyse des précipitations. De 1981 à 1988, les débits sont essentiellement au dessus de la moyenne de 325 L.s^{-1} alors que de 1989 à 2002 les débits sont déficitaires.

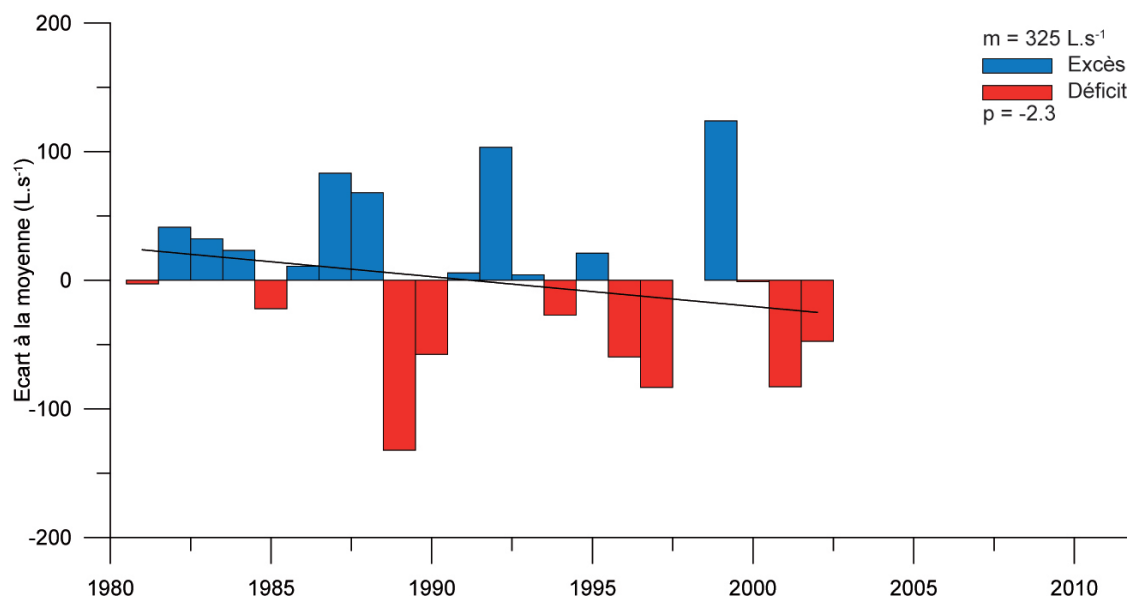


FIGURE 7.32 – Ecart à la moyenne du débit moyen annuel mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

Les écarts à la moyenne du débit instantané maximal annuel de la source de Bange - l'Eau Morte sont présentés figure 7.33. La tendance globale des débits instantanés est à la hausse avec une pente de 68.79 pour la droite de tendance. Cette observation signifie que sur la période 1981 - 2002, les débits sont plus extrêmes avec entre autres les années 1998 et 2001 qui présentent un débit de 5 500 L.s⁻¹ environ.

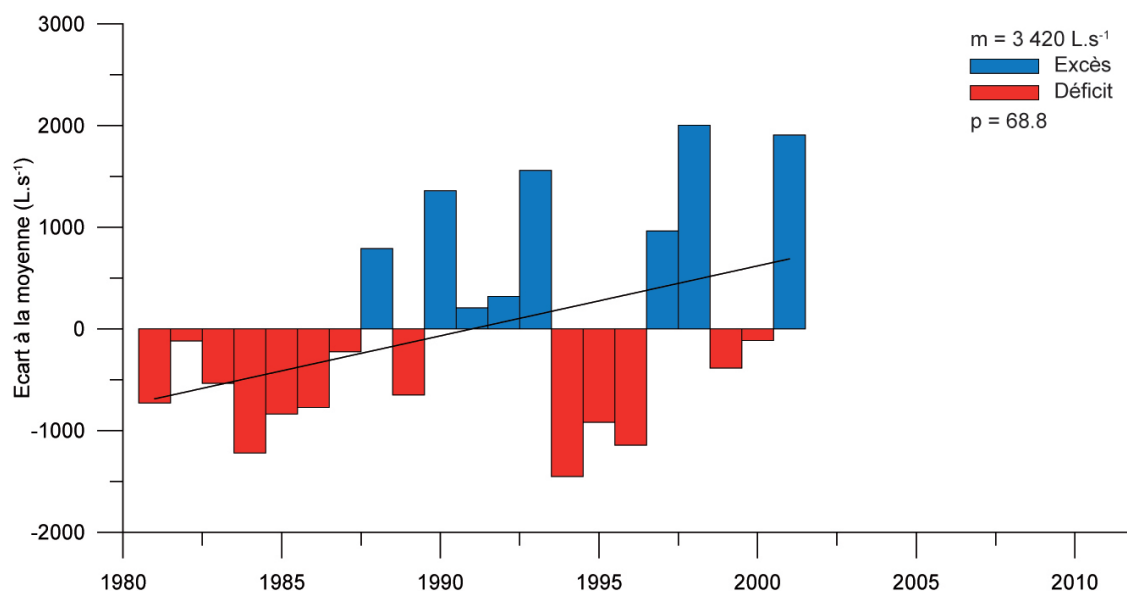


FIGURE 7.33 – Ecart à la moyenne du débit instantané maximal mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

La figure 7.34 expose les écarts à la moyenne des débits minimums instantanés mesurés à la source de Bange - l'Eau Morte de 1981 à 2002. La tendance générale montre une hausse des débits minimums avec une pente de 0.435 pour la droite de tendance. Sur cette période, les étiages deviennent moins soutenus.

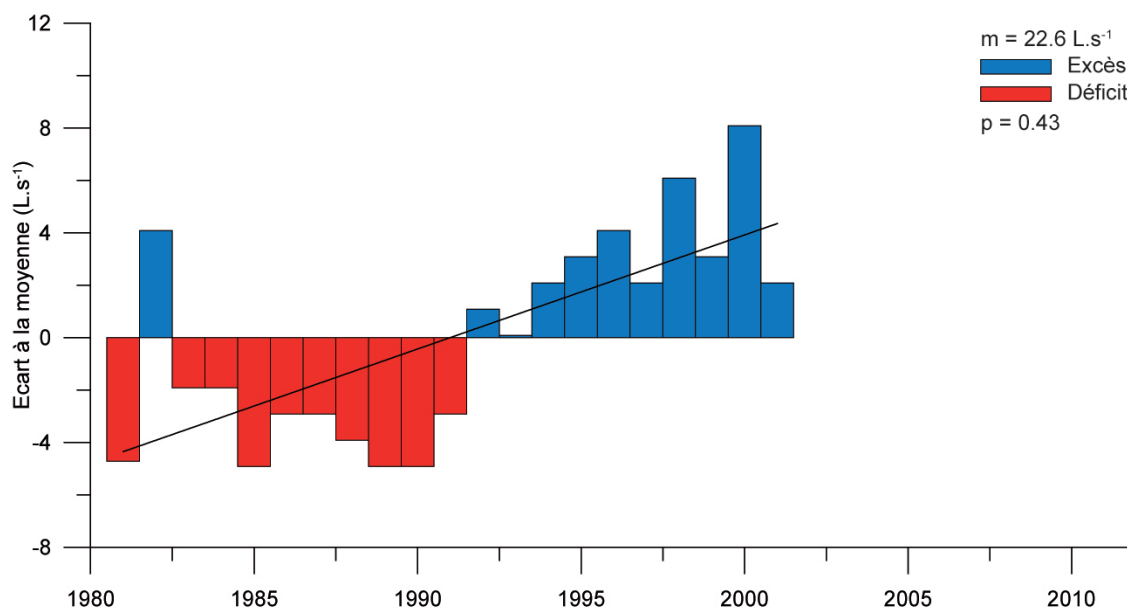


FIGURE 7.34 – Ecart à la moyenne du débit instantané minimal mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

La figure 7.35 présente l'écart à la moyenne des débits moyens mensuels mesurés à la source de Bange - l'Eau Morte sur la période 1981 - 2002. Nous pouvons diviser les résultats en deux parties avec d'un coté les mois où la pente de la droite de tendance est positive et de l'autre où les pentes sont négatives.

Les mois de Janvier, de Mars, d'Avril, de Mai, de Juin, d'Août et d'Octobre ont une évolution des débits à la baisse. Les mois qui présentent une évolution très significative sont Avril et Mai avec des pentes respectives de -17.2 et -18.71. Ceci peut être expliqué par une fonte des neiges plus précoces ou un stock plus limité.

Les mois de Février, de Juillet, de Septembre, de Novembre et de Décembre présentent une évolution des débits qui tendent vers la hausse. Les mois les plus significatifs sont ceux de Février et de Juillet qui affichent des pentes respectives de 13.22 et 8.44. L'augmentation du mois de Février pourrait être expliquée par une hausse des températures permettant une fusion plus précoce de la neige. Pour le mois de Juillet, l'explication la plus probable serait une augmentation des précipitations locales ou d'un changement de régime de l'évapotranspiration.

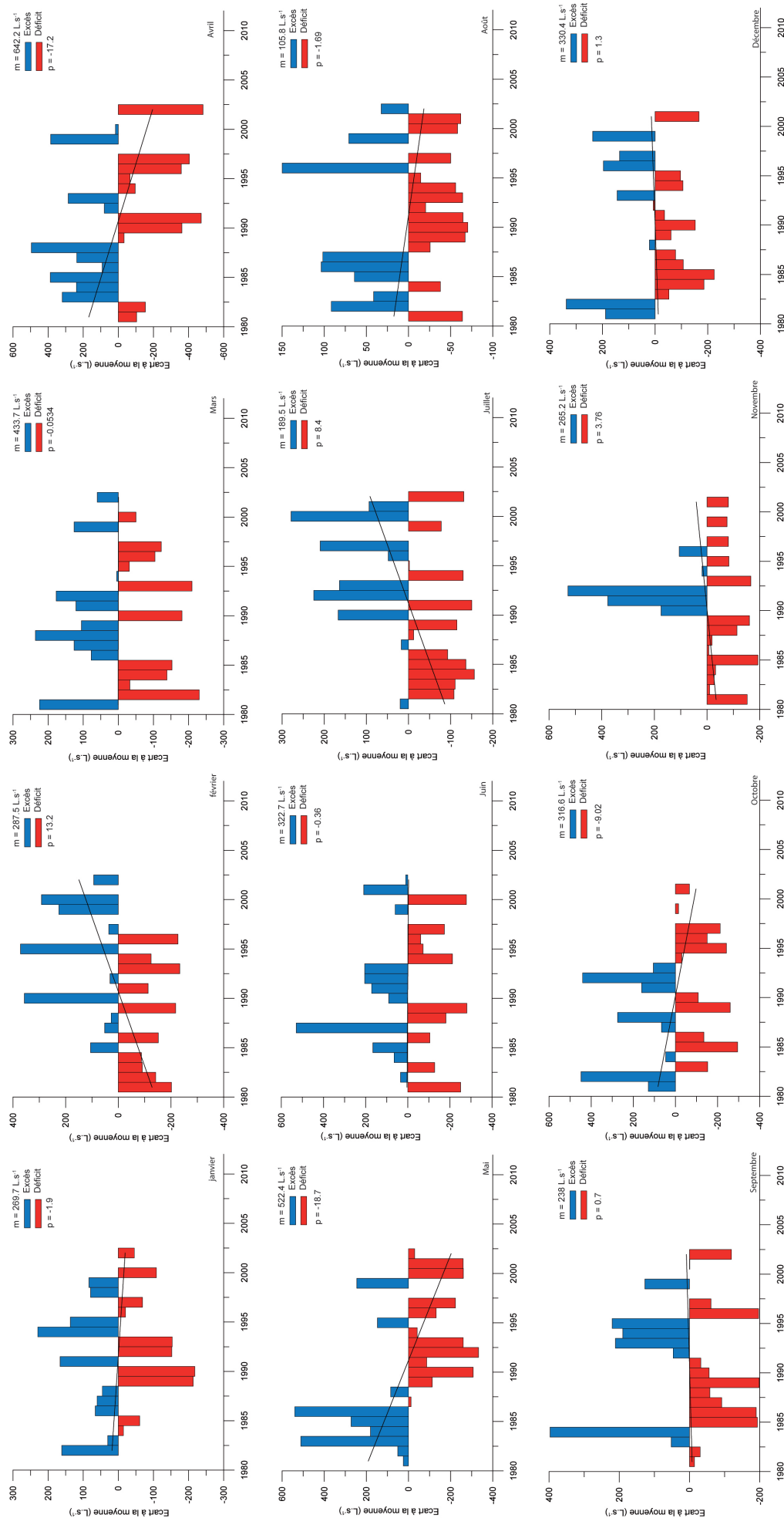


FIGURE 7.35 – Ecart à la moyenne des débit moyen mensuel mesuré à la station de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

Nous nous sommes intéressés aux fréquences moyennes des crues (Figure 7.36). Pour cela, nous avons calculé la valeur seuil de crue sur la période 1981-2002 sur le site de la source de Bange - l'Eau Morte. Tous les pics de crue dépassant $3\,420\text{ L.s}^{-1}$ et séparés d'un intervalle de cinq jours d'une crue passée ont été retenus. Globalement, la tendance est à la hausse, sur la période 1980 à 2002, la fréquence de crue passe de 4 à 6 par année.

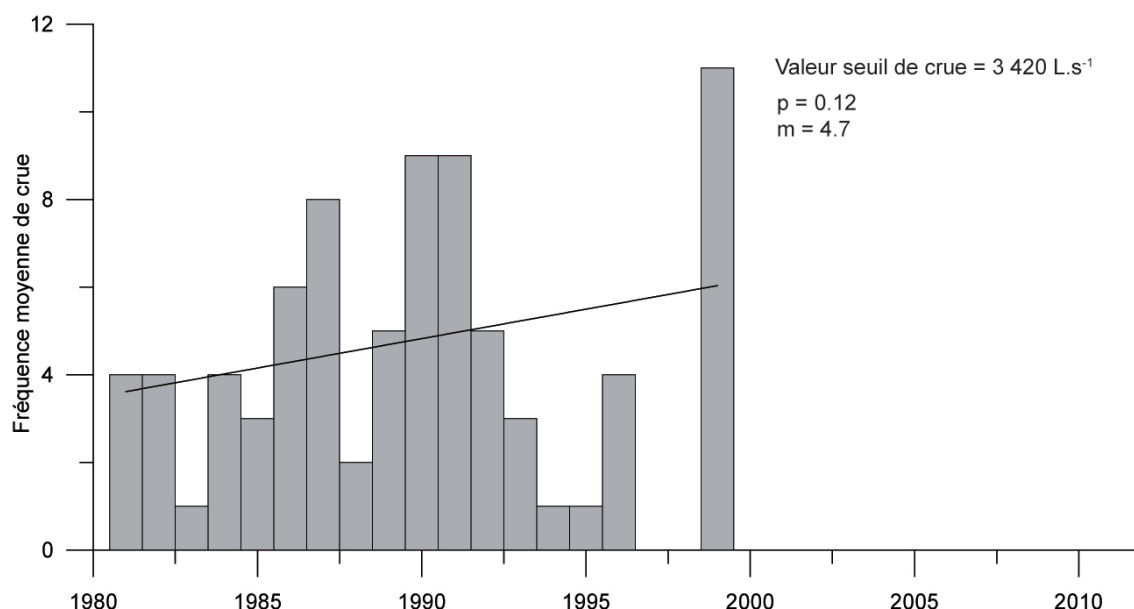


FIGURE 7.36 – Fréquence des crues à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

La figure 7.37 présente le nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ estimé à 26 L.s^{-1} avec une pente de droite de tendance estimée à -0.79 . Les étiages continus durent donc moins longtemps, des pluies locales (ou orages) peuvent augmenter le débit de la source permettant le dépassement du $V_{cn}(10)$.

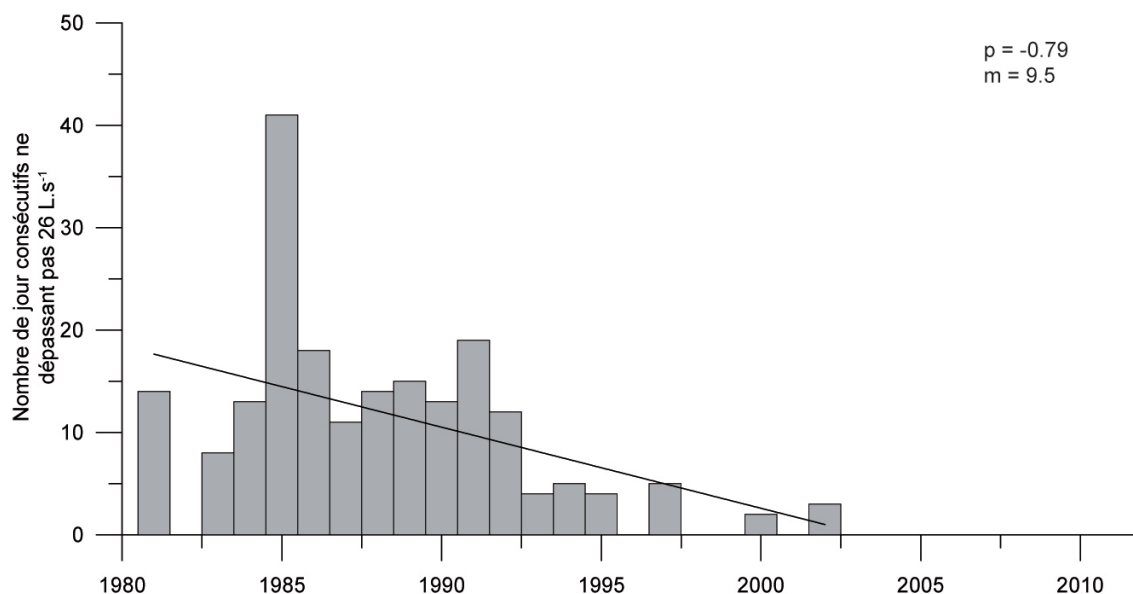


FIGURE 7.37 – Nombre de jours consécutifs ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

Suite à cette analyse, nous avons observé le nombre de jours total au cours d'une année ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ estimé à 26 L.s^{-1} (Figure 7.38). La pente de la droite de tendance est de -1.61 . Comme pour l'analyse précédente, nous observons que les étiages sont plus courts. Toutefois, la période de 1989 à 1991 montre un nombre de jour total beaucoup plus important que sur la figure 7.37. La raison la plus probable serait que les petites pluies augmenteraient le débit suffisamment pour dépasser les 26 L.s^{-1} mais ne seraient pas assez abondantes pour durer dans le temps.

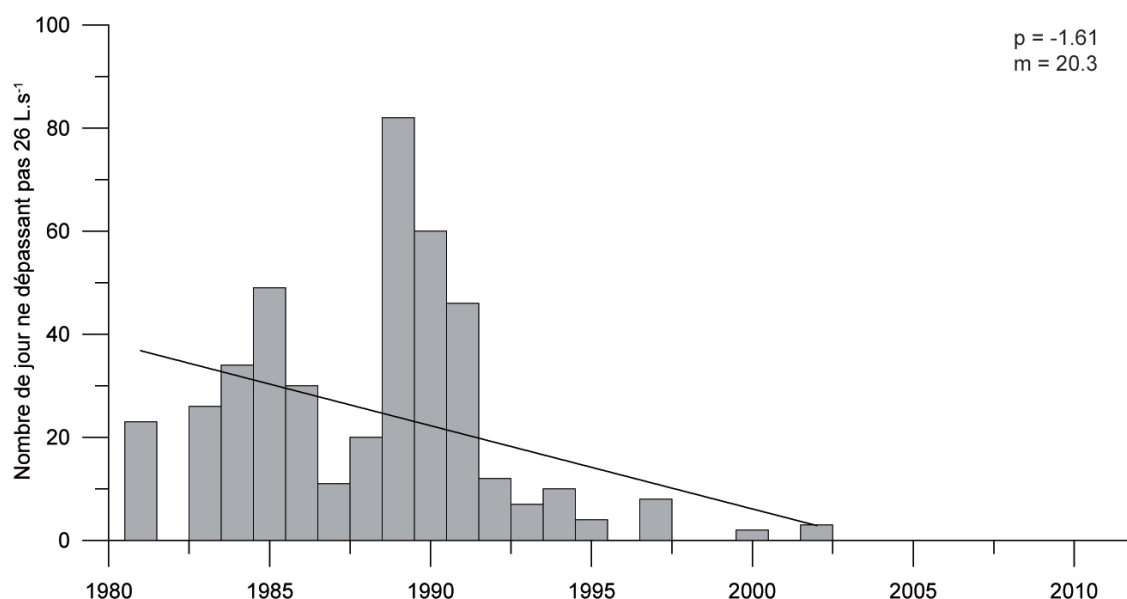


FIGURE 7.38 – Nombre de jours total ne dépassant pas le $V_{cn}(10)$ à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

Nous avons réalisé une analyse corrélatoire simple des débits sur les données de

Bange - l'Eau Morte (Figure 7.39) afin de vérifier si la régulation du stockage d'eau est homogène sur la période 1981 - 2002. Nous observons que sur les 22 ans d'analyse la pente de la droite de tendance est à la baisse avec une valeur de -0.43. L'effet mémoire est en baisse passant de 12 à 4 jours en moyenne. La régulation des réserves en eau se fait moins bien.

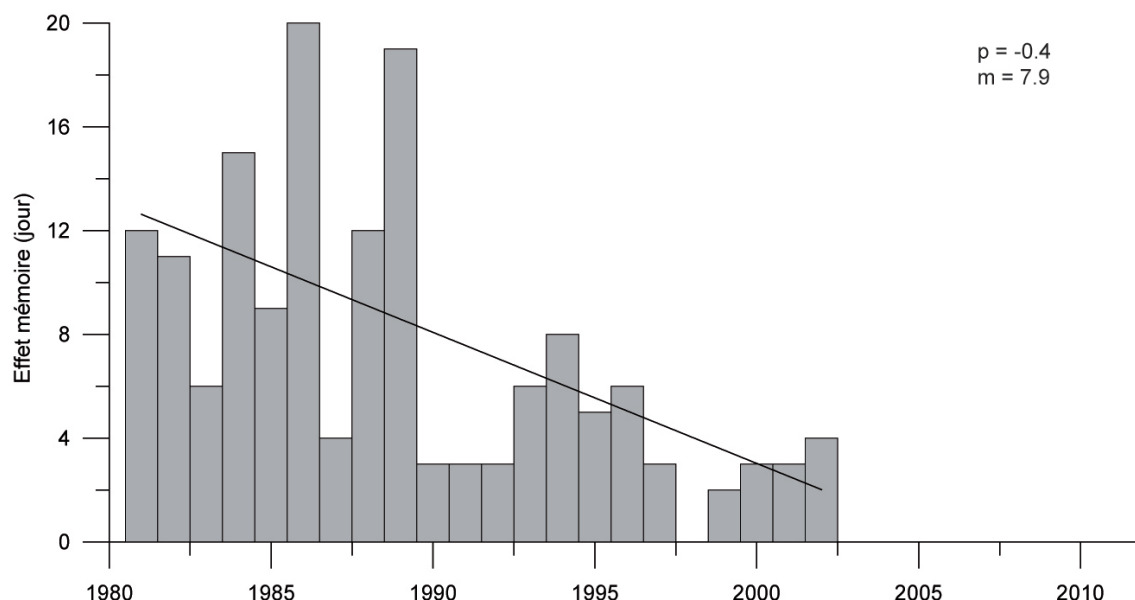


FIGURE 7.39 – Coefficient de corrélation annuel calculé à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

Nous avons cherché la date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière (Figure 7.40) dans le but de vérifier s'il existait bien une précocité du phénomène. Dans l'ensemble, nous notons une avancée de la date de la fusion du stock de neige. Le pic de crue passe du 150^e jour au 120^e jour, soit une avancée de 1 mois. La fonte qui commençait fin Mai dans les années 60, débute maintenant fin Avril. Ce résultat est validé par l'augmentation des températures sur les deux mois.

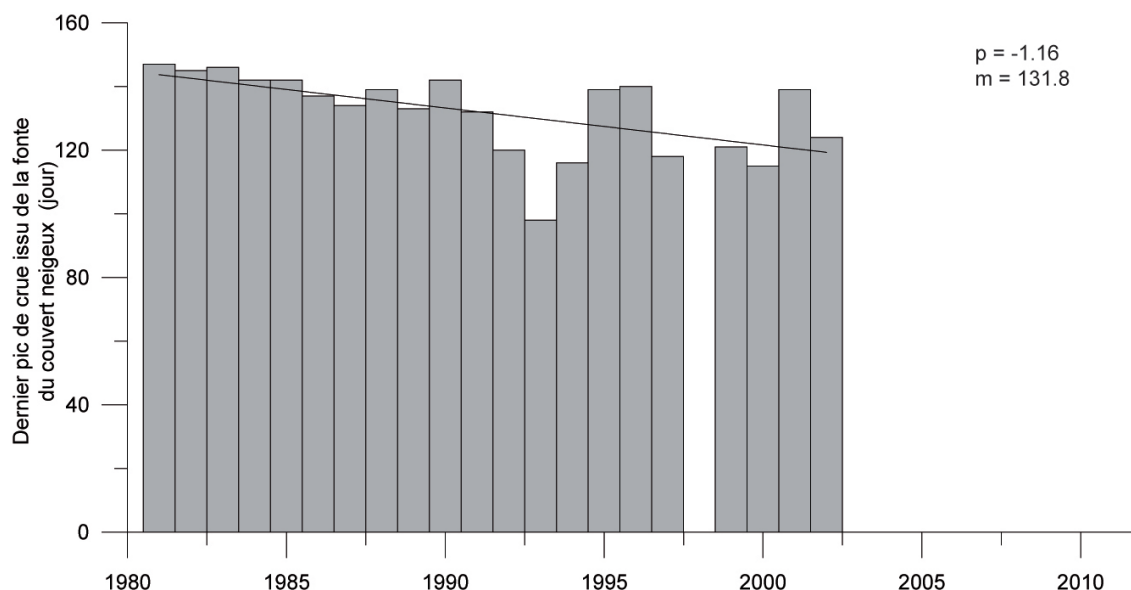


FIGURE 7.40 – Date du premier pic de crue marquant le début de la fusion printanière mesuré à la source de Bange-l'Eau Morte (1981-2002)

4 Evolution la ressource en eau

4.1 Rappels sur les prévisions climatiques

Les changements climatiques ont été modélisés pour la région Rhône-Alpes au cours du XXI^{me} siècle lors d'une étude de Météo France [2010]. L'étude s'est appuyée sur les 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre proposés par le GIEC (A1b, A2 et b1) selon le modèle climatique Arpège-climat.

Le scénario A2 est défini par un développement économique des entités régionalisées, une croissance démographique continue et un objectif régional d'auto-suffisance. Le scénario A1b propose une croissance économique rapide et globale avec une atteinte d'un pic démographique et un équilibrage des sources d'énergies (fossiles et/ou renouvelables).

Le dernier scénario b1 se caractérise par l'atteinte d'un pic démographique, une transition globale vers une économie de services et un développement durable.

Les pronostics moyens des trois scénarios retenus avancent que :

- en 2030, la température moyenne annuelle devrait augmenter de 1 à 2°C et les cumuls des précipitations devraient diminuer de 5 à 10% ;
- en 2050, l'augmentation des températures serait comprise entre 1.5 et 2.5°C alors que les cumuls présenteraient des déficits de l'ordre de 10 à 15% ;
- en 2080, l'estimation des températures varie entre +2 à +5°C et le manque des précipitations atteindrait les 20% (soit environ 300 mm).

4.2 Estimation de valeurs d'évapotranspiration réelle dans les pré-Alpes

Pour l'évolution de la ressource en eau, nous nous sommes basés sur les valeurs de l'évolution des températures et des précipitations estimées par le GIEC [2007]. Nous avons appliqué les valeurs données à l'équation de Turc pour estimer les déficits futurs, en prenant le scénario le plus alarmiste (A2). Avant de calculer cette estimation, nous avons regardé si l'équation de Turc était adaptée dans les pré-Alpes. Pour cela, en fonction des déficits d'écoulements calculés (partie 2.3 du Chapitre 7), nous avons recalculé les débits moyens annuels du Chéran (Figure 7.41). Nous avons donc soustrait la valeur annuelle d'évapotranspiration (en mm) aux cumuls annuels des précipitations, mesurés à la station météorologique de Lescheraines, pour déterminer les cumuls de pluies efficaces. Puis nous avons calculé les écoulements d'eau annuel en multipliant les valeurs de pluies efficaces à la superficie du bassin d'alimentation, et enfin, nous les valeurs obtenues aux débits observés du Chéran. Globalement, hormis quelques points aberrants, les débits estimés du Chéran sont assez proches de ceux mesurés à la Charniaz (14% d'erreur en prenant en compte les points aberrants). Au vu des résultats, nous pouvons utiliser la formule de Turc pour déterminer les déficits futurs dans les pré-Alpes à partir des données de la station de Lescheraines.

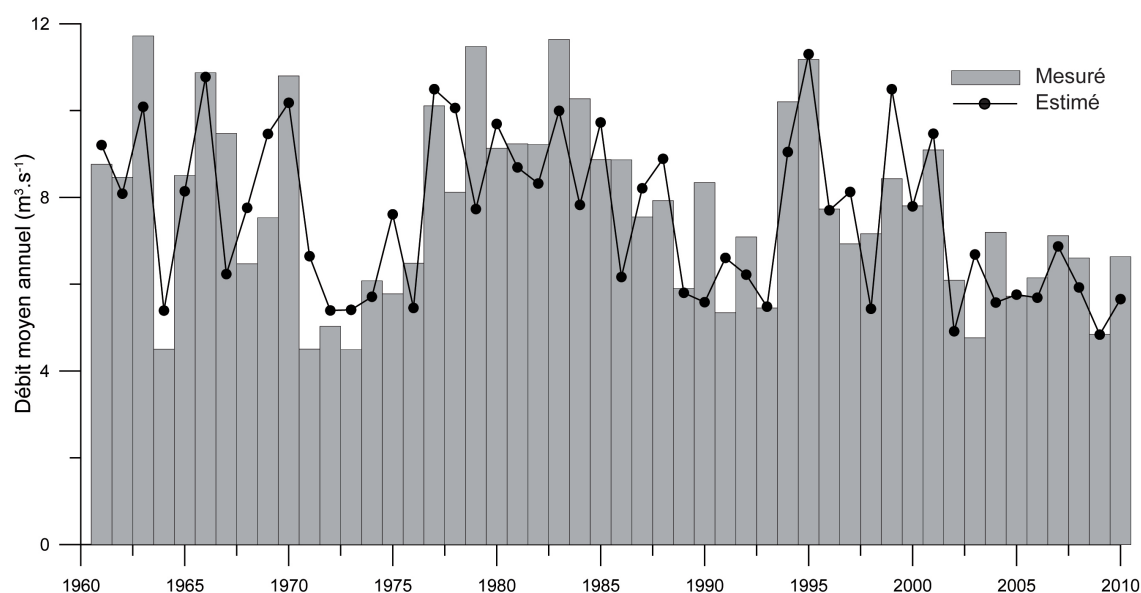


FIGURE 7.41 – Comparaison entre les données de débits du Chéran observées et simulées à partir du calcul de l'évapotranspiration

Les valeurs moyennes calculées des données de la station météorologique de Lescheraines, entre 1960 et 2011, sont de 1460 mm pour les précipitations et de 8.4°C pour les températures. Les déficits calculés par la méthode de Turc pour les années 2030, 2050 et 2080 sont présentés dans le tableau 7.1. Nous observons que lorsque l'on fait varier les températures et les précipitations selon les données du GIEC, les valeurs d'évapotranspiration réelle augmentent de façon significative. En 2030, l'évapotranspiration augmenterait de 11%, puis de 17% en 2050 pour atteindre les 26% en 2080. La deuxième partie du tableau ne fait varier que les températures dans le but

de déterminer l'effet du réchauffement sur l'évapotranspiration. Nous remarquons que les déficits sont plus importants, ce qui signifie que l'élévation de la température est le facteur clé de l'évapotranspiration. Enfin, nous avons uniquement fait jouer les précipitations et nous observons que le phénomène d'évapotranspiration s'inverse. Cette tendance s'explique par le fait que moins il y a d'eau qui arrive sur le sol et moins l'évapotranspiration est possible. De plus, le manque d'eau provoque un stress hydrique de la plante et fait baisser le rendement d'évapotranspiration.

Tableau 7.1 – Evolution de l'évapotranspiration en fonction des modifications des températures (8.4°C) et de précipitations (1460 mm) moyennes calculées à la station de Lescheraines pour la période 1960 - 2010

Année	ΔP et ΔT	ΔT et P constant	ΔP et T constant
2030	↗ de 11%	↗ de 13%	↘ de 0.6%
2050	↗ de 17%	↗ de 20%	↘ de 1.3%
2080	↗ de 26%	↗ de 33%	↘ de 3%

Avec ΔP = variation des précipitations avec une baisse de 5% en 2030 de 10% en 2050 et de 20% en 2080 et ΔT = variation des températures avec une hausse de 1°C en 2030 de 2°C en 2050 et de 5°C en 2080

Toutefois, si nous basons l'estimation sur la période la plus déficitaire 2000 - 2010, la moyenne annuelle des températures est de 9.2°C et la moyenne des précipitations est de 1305 mm. Ces deux valeurs différentes entraînent une baisse de l'importance de l'évapotranspiration (Tableau 7.2). Nous observons les mêmes types de comportement identifiés dans le tableau 7.1. Cependant, même si les valeurs de températures sont de un degré supérieur par rapport à la moyenne précédente, le phénomène d'évapotranspiration est inférieur aux premières estimations. Le manque de précipitations joue donc un rôle important dans les estimations.

Tableau 7.2 – Evolution de l'évapotranspiration en fonction des modifications des températures (9.2°C) et de précipitations (1305 mm) moyennes calculées à la station de Lescheraines pour la période 2000 - 2010

Année	ΔP et ΔT	ΔT et P constant	ΔP et T constant
2030	↗ de 11%	↗ de 11%	↘ de 0.7%
2050	↗ de 15%	↗ de 18%	↘ de 1.7%
2080	↗ de 21%	↗ de 31%	↘ de 4.7%

Avec ΔP = variation des précipitations avec une baisse de 5% en 2030 de 10% en 2050 et de 20% en 2080 et ΔT = variation des températures avec une hausse de 1°C en 2030 de 2°C en 2050 et de 5°C en 2080

Enfin, à partir des données d'évapotranspiration obtenues par la méthode de Turc, nous avons pu estimer, en se basant sur la pluie efficace (Tableau 7.3), les débits moyens annuels futurs des trois sources étudiées. Ainsi, nous observons que les débits du Chéran passeront de 7 685 L.s⁻¹ (moyenne sur la période 1960 - 2011) à 4 080 L.s⁻¹ en 2080, soit une perte de presque la moitié du débit actuel. L'estimation des débits de la source du Groin a été basée sur une pluviométrie annuelle de

1153 mm et une température moyenne de 10.7°C, mesurée à la station météorologique d'Ambérieu sur la période 1961 - 1990. Le déficit d'écoulement moyen calculé à la station d'Ambérieu est de 558 mm contre 509 mm calculé à la station de Lescheraines. Nous remarquons que les débits actuels seront réduit de moitié en 2080, passant de 3 230 L.s⁻¹ à 1 430 L.s⁻¹. Enfin, cette même observation se retrouve sur l'estimation des débits de la source karstique de Bange - l'Eau Morte. Les débits passeront de 325 L.s⁻¹ à 190 L.s⁻¹ en 2080.

Globalement, l'augmentation des températures et la baisse ou non des cumuls de précipitations vont entraîner une augmentation de l'évapotranspiration et donc faire baisser le cumul des pluies efficaces. A partir des estimations actuels du GIEC, la ressource en eau dans la région pré-alpine devrait se réduire de moitié d'ici l'horizon 2080. Toutefois, avant d'être alarmiste, il faudra attendre les prochains résultats du GIEC 2013, pour affirmer ou infirmer les résultats obtenus ici.

Tableau 7.3 – Estimations des débits en 2030, 2050 et 2080 pour le Chéran, le Groin et Bange - l'Eau Morte

Année	Qm du Chéran (L.s ⁻¹)	Qm du Groin (L.s ⁻¹)	Qm de Bange - l'Eau Morte (L.s ⁻¹)
Qm sur la période 1960 - 2011	7 685	3 230	325*
2030	6 460	2 680	256
2050	5 670	2 260	215
2080	4 080	1 430	190

*Avec Qm le débit moyen et * moyenne réalisée sur la période 1981 - 2002*

5 Conclusions

L'étude a été effectuée selon deux axes : l'analyse des données de températures et des précipitations sur trois sites et l'analyse des débits de trois stations de jaugeages représentatives chacune d'un mode d'écoulement différent en milieu karstique (surface, mixte ou souterrain).

Les stations météorologiques retenues ont été Lescheraines et Aillon-le-Jeune situées dans le massif des Bauges et la station de Voglans mesurant les variations climatiques de la plaine chambérienne. L'étude de ces trois sites aboutit aux mêmes résultats. Les températures présentent une hausse particulièrement marquée depuis 1987 (+1.5°C environ). Les cumuls des précipitations peuvent être divisés en deux périodes : la première de 1950 à 1978 où les variations des cumuls sont assez homogènes ; la seconde période de 1979 à 2011 caractérisée par une baisse significative des précipitations.

L'étude de l'évapotranspiration réalisée à partir des données de la station météorologique de Lescheraines montre une grande similarité avec l'augmentation des températures. Depuis 1950, la tendance observée est à la hausse avec un gain moyen annuel de 1 mm. Entre 1950 et 1986, les valeurs d'évapotranspiration sont inférieurs

à 510 mm, avec des extrêmes calculées à 460 mm dans les années 70. A partir de 1987, les déficits d'écoulements sont excédentaires à la moyenne en étroite relation avec la hausse des températures sur les mêmes périodes.

L'étude a porté sur le suivi de trois sites ayant des contributions d'alimentation en eau. Le Chéran est alimenté principalement par le ruissellement des eaux de pluie mais possède une forte contribution karstique. L'eau de la station du Groin a vraisemblablement origine principale son exutoire karstique mais la distance de la station de jaugeage vis à vis de la source entraîne une contribution non négligeable de l'écoulement de surface à l'aval de l'exutoire. Enfin, les données du système karstique de Bange - l'Eau Morte ne proviennent que de l'exutoire. Les résultats obtenus ne sont pas toujours similaires entre les sites.

L'analyse des débits moyens annuels montre que les trois sites ont les mêmes comportements sur deux périodes. De 1960 à 1980, il n'existe pas vraiment d'évolution, il y a un bon équilibre entre les années. Après 1980, nous observons une baisse des débits. Ces observations corroborent celles obtenues pour les précipitations avec un léger décalage d'un ou deux ans. Les systèmes karstiques étudiés, représentatifs des bassins de montagnes, peuvent être considérés comme des milieux très transmissifs pouvant tamponner leur réserve sur un ou deux ans.

Les événements dit "extrêmes" caractérisés par les intensités maximales instantanées affichent pour le Chéran et la source du Groin une baisse sur la période 1960 - 2011. Toutefois, en incluant le système karstique de Bange - l'Eau Morte et en réalisant l'étude sur 1980 - 2002, nous observons une augmentation de ce type d'événement. Ce résultat montre que sur une plus longue période le site de Bange - l'Eau Morte aurait lui aussi une tendance à la baisse.

La fréquence des crues au cours d'une année est en baisse pour le Chéran et la source du Groin sur les deux périodes d'étude. Le système karstique de Bange - l'Eau Morte affiche une tendance à la hausse des fréquences de crue. Cette tendance différente serait due à la taille du bassin d'alimentation beaucoup plus petit. En effet, le bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte est de 12 km² contre plus de 200 km² pour les deux autres. De plus le site de Bange - l'Eau Morte correspond uniquement en un système karstique, les eaux ne ruissellent pas et sont concentrées au sein du système. Nous mettons ainsi en évidence une nouvelle spécificité des petits bassins versants karstiques de montagnes.

Les débits minimums instantanés présentent pour le Chéran et la source du Groin une baisse sur les deux périodes d'étude. Le système karstique de Bange - l'Eau Morte affiche des valeurs à la hausse. Cette différence peut être due à la taille du bassin d'alimentation de Bange - l'Eau Morte. Plus petit, il peut réagir plus rapidement aux précipitations. Les eaux s'infiltrant et ressortent rapidement ne laissant pas le temps au phénomène d'évapotranspiration.

En ce qui concerne la durée des périodes d'étiage, le Chéran ne montre pas de véritable variation sur la période 1960 - 2011. Cependant le site présente une baisse

de la durée sur la période 1980 - 2002, tout comme le système karstique de Bange - l'Eau Morte. La source du Groin possède des tendances à la hausse des périodes d'étiage sur les deux référentiels temps. Ceci pourrait être expliqué par un effet de site avec des précipitations plus abondantes au niveau du domaine jurassien. Malheureusement nous ne disposons pas, dans les environs, d'une station météorologique possédant une chronique complète suffisamment longue pour le vérifier.

La fonte des neiges est plus précoce pour les trois sites et les deux périodes d'étude, avec une avancée de presque 1 mois. Cette fusion nivale semble s'être surtout accélérée à partir de 1985, avant elle est considérée comme plutôt stable.

Au final, nous observons une augmentation des températures avérée et déjà identifiée sur plusieurs autres sites dans le monde. Cette augmentation ne semble pas se stabiliser dans le temps mais va continuer à croître. Les précipitations, bien que stables de 1950 à 1980, marquent une baisse significatives sur la période 1980 - 2011. Cette tendance est particulièrement marquée depuis 2003 où les manques dans le cumul annuel des précipitations sont de l'ordre de 400 mm. Nous pouvons donc nous demander quelles seront les tendances futures ?

Pour répondre à cette question, nous avons utilisés les valeurs des projections du GIEC 2007. Il est annoncé qu'en 2030 la température en Rhône - Alpes augmenterait de 1°C et que les précipitations annuelles diminueraient de 5%, +2°C et -10% en 2050, et enfin +5°C et -20% en 2080. A partir de ces données et en utilisant la formule de Turc nous avons pu envisager les valeurs d'évapotranspiration de ces trois années. Ainsi, nous avons estimé des augmentations de l'évapotranspiration de l'ordre de 11% en 2030, de 17% en 2050 et de 26% en 2080. Ces résultats nous ont permis de calculer les débits futurs des sites d'étude. En moyenne pour les sites du Chéran, de la source du Groin et de Bange - L'Eau Morte, les débits diminueront de 18% en 2030, de 30% en 2050 et de 46% en 2080. Toutefois, pour obtenir ces résultats, nous nous sommes basés sur les projections les plus alarmistes du GIEC 2007. Il faudra cependant attendre les nouveaux résultats du GIEC 2013 dans le but de vérifier si les projections utilisées ne sont pas surestimées.

Conclusion Générale

Les problématiques de la thèse reposent sur plusieurs axes complémentaires :

- **étudier en détail et comprendre le fonctionnement hydrologique des systèmes karstiques ;**
- **définir les différents degrés de vulnérabilité au sein des bassins d'alimentation des systèmes étudiés et entre les systèmes karstiques ;**
- **analyser les transferts naturels des matières en suspension et dissoutes au sein des systèmes karstiques ;**
- **déterminer des indicateurs liés à la remobilisation du sol suite à des travaux anthropiques pouvant entraîner un impact sur la qualité des eaux karstiques ;**
- **appréhender les conséquences et l'évolution de la qualité et de la quantité des ressources en eau dans un contexte de changement climatique.**

Pour répondre à ces objectifs, nous avons sélectionné et étudié huit sites composés de rivières, de cavité karstique et de sources karstiques avec des intensités de suivi différentes et sur des périodes plus ou moins longues. Pour répondre aux trois premiers objectifs les sites de La Roche Saint Alban, de La Combe, de Fontaine Noire, de Fontaine Froide et de la cavité karstique du Creux des Elaphes ont été retenus. La prévision et les conséquences d'un changement climatique ont été étudiées par l'analyse des chroniques de débits du Chéran, de Bange - l'Eau Morte et de la source du Groin. Ces sites ont été associés aux analyses des températures de l'air et des précipitations des stations météorologiques de Lescheraines, de Voglans et d'Aillon-le-Jeune. La diversité des sites d'études et leurs répartitions font que dans l'ensemble, ils représentent bien les domaines sub-alpins.

Caractérisation et fonctionnement hydrologique des sites d'études

Les connaissances hydrogéologiques parcellaires des systèmes karstiques ont nécessité, dans un premier temps, une étude de leur fonctionnement. Cette étude se base, pour partie, sur les mesures en continu des débits, de la turbidité, de la conductivité et la température obtenues depuis l'équipement des émergences en 2009. Deux fluorimètres de terrain ont également été installés afin de suivre la matière organique fluorescente. Le suivi en continu est accompagné d'échantillonnages hebdomadaires. Les échantillons ont fait l'objet d'une mesure systématique (fluorescence, UV-VIS, physico-chimie) et plus ponctuelle (bactériologie, hydrocarbure, etc).

Les résultats montrent un fonctionnement hydrodynamique des systèmes karstiques assez similaire bien que la nature des formations géologiques carbonatées et la

taille des bassins versants différent. Les réponses des émergences aux précipitations sont assez rapides avec des temps inférieurs à 2 jours. Cependant, le développement de la karstification diffère.

Le système de La Roche Saint Alban possède des réseaux spéléologiques bien développés débouchant sur un important karst noyé. Cette spécificité lui confère une bonne homogénéisation des eaux. Ainsi, les valeurs de turbidité ne dépassent que très rarement les normes de potabilité.

Les systèmes karstiques de La Combe, de Fontaine Noire, de Bange - l'Eau Morte et de la source du Groin sont définis comme des systèmes possédant un réseau de drainage très développé et sont caractérisés par une zone noyée peu importante. La turbidité sur ces sites peut atteindre des valeurs importantes et montrer une forte récurrence dans les venues des matières en suspension.

Le système de Fontaine Froide est caractérisé comme possédant un réseau plus développé en amont qu'à l'aval et pouvant présenter des retards dans l'infiltration. Bien qu'étant un site différent des autres, ce site n'a pas pu faire l'objet d'un suivi complet. Les valeurs de turbidité ne sont pas connues.

Couvert pédologique

Les bassins versants des sites d'étude sont composés des mêmes types de roche, les sols qui se développent à leurs surfaces ont globalement les mêmes caractéristiques. Dans les massifs subalpin et jurassien, la végétation et les faciès des roches sont homogènes, les sols identifiés sont de trois types.

Sur les roches calcaires, fracturées ou non, sont retrouvés des organosols ou des rendzines. Ceux-ci sont peu développés, sont pauvres en argile mais riches en matière organique. La différence entre les deux types repose sur le fait que l'organosol est acide alors que la rendzine est basique (présence de calcaires). L'infiltration est très efficace sur ce type de sol.

Sur les faciès marneux ou argileux se développent des sols bruns. Ils sont très épais et sont caractérisés par de forte teneur en argile. Ils ne permettent pas une bonne infiltration.

Enfin, localement, à la surface des faciès gréseux se développent des podzols.

Vulnérabilité des sites d'études

La méthode PaPRIKa est appliquée dans le but de localiser les degrés de vulnérabilités sur les bassins d'alimentation des systèmes karstiques. Les karsts de moyenne montagne sont régulièrement de petite taille et possèdent généralement de fortes pentes, la méthode n'a donc pas toujours été évidente à employer. Elle montre souvent des redondances dans l'information, avec notamment le critère sol et le critère roche. Les sols se développant en fonction du faciès de la roche, les cartes de ces deux paramètres sont souvent semblables. Le critère infiltration présente une pondération un peu trop forte. Dans la méthode, il est considéré que des pentes fortes provoquent un ruissellement des eaux de pluie or sur les bassins d'alimentation à fort couvert forestier, nous notons de forte infiltration et peu de ruissellement. Le manque de données sur la taille de la zone non saturée et sur l'épikarst rend l'appli-

cation des critères plus difficile. Enfin, la méthode PaPRIKa ne semble pas prendre en compte les liens fonctionnels entre les zones. Certaines zones, identifiées comme peu vulnérable, peuvent engendrer une remobilisation en aval (exemple de Bange - l'Eau Morte) et doivent donc faire l'objet de protection pour les activités humaines.

Toutefois, la méthode PaPRIKa est un bon outil pour définir le degré de vulnérabilité des bassins d'alimentation des systèmes karstiques de moyenne montagne. Elle a permis de montrer que le bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban est peu vulnérable à une remobilisation du sol. En ajoutant le fait que le système possède une grande zone noyée, il ne devrait pas y avoir de forte pollution. A contrario, les systèmes de La Combe, de Fontaine Noire, de Fontaine Froide et de Banges - l'Eau Morte présentent des vulnérabilités moyennes à fortes. Ces sites sont très exposés aux phénomènes de remobilisation des sols d'autant plus qu'ils sont fortement développés d'un point de vu karstique et ne possèdent que peu de réserve.

Etat des lieux des systèmes karstiques

Le suivi des paramètres liés à l'activité organique montre une évolution saisonnière associée aux crues pendant un cycle hydrologique. Cette saisonnalité mise en évidence par le suivi de la matière organique fluorescente est plus ou moins marquée en fonction des sites. Principalement d'origine pédologique, elle se caractérise par le type humique, le type protéique et un type caractérisant l'activité microbiologique. Leurs études permettent également de mieux comprendre les écoulements au sein du système karstique. Le type humique caractérise les venues de surface. Le type protéique semble provenir des écoulements épikarstiques. La matière organique issue de l'activité microbiologique apparait après des périodes d'étiage, caractérisant vraisemblablement une reprise d'eau stagnante. Le type humique est beaucoup important durant les crues d'été. Le type protéique montre des intensités maximales lors de forte récession. Cette saisonnalité est également perceptible par l'étude infrarouge des sédiments. En effet, en fonction des périodes au cours d'un cycle hydrogéologique, les teneurs en matière organique et en argile varient. Cette différence s'explique par l'importance plus ou moins grande de la contribution endokarstique. Les venues endokarstiques apportent principalement des argiles. Ces apports sont aussi perceptibles en réalisant le rapport des mesures entre la turbidité et les matières organiques de type humique.

Impacts de la remobilisation des sols

Les études des paramètres physico-chimiques et biologiques sur les 5 sites ont permis de mettre en évidence les indicateurs liés à l'impact de la sylviculture. Ils se caractérisent par une augmentation de leur teneur par rapport à l'évolution saisonnière. Sur la zone vulnérable du site de La Combe et à l'aplomb du Creux des Elaphes, les travaux liés à la sylviculture ont entraîné une augmentation très importante des venues des matières organiques du type humique et protéique (avec des valeurs 10 fois supérieures à la normale). La turbidité (plus fréquente), le COT (jusqu'à 12 mg.L⁻¹) et le Nt (15 mg.L⁻¹) viennent confirmer cette augmentation. Le site du Creux des Elaphes a mis en évidence que sous un organosol, les valeurs

des mesures des paramètres sont légèrement plus importantes que sous un sol brun. Toutefois, les points de mesure ne caractérisent pas réellement les écoulements sous un type de sol, mais plus particulièrement l'ensemble du bassin d'alimentation avec des apports plus influencés en fonction du type de sol sus-jacent. Les travaux sur le bassin d'alimentation de La Roche Saint Alban, bien que de grande ampleur, n'ont pas occasionné de changements significatifs. Ils ont été réalisés sur une zone de très faible sensibilité et très éloignée de la source. Les travaux de sylviculture dans le bassin d'alimentation de Fontaine Noire se sont effectués dans une zone assez sensible. Toutefois, aucune augmentation significative des indicateurs précédents n'a été relevée. Cette absence d'impact pourrait résulter de la présence d'un sol brun particulièrement épais sur cette zone. Le fonctionnement particulier des systèmes karstiques nécessite un suivi à haute fréquence de la qualité des eaux, il s'avère ici que le suivi en continu des matières organiques fluorescentes associées à la turbidité et au COT est un moyen d'identifier l'impact des activités forestières. Enfin, le site de Fontaine Froide, où aucune activité n'a été recensée, l'absence de forte augmentation du COT, de Nt et des matières organiques fluorescentes vient conforter les observations de La Combe et du Creux des Elaphes.

Conséquences de l'évolution climatique

L'étude a été effectuée sur l'analyse des données de températures et des précipitations à partir des données de trois stations météorologiques ainsi que sur l'analyse des débits de trois stations de jaugeages.

Les analyses réalisées sur les données des stations météorologiques de Lescheraines, d'Aillon-le-Jeune et de Voglans présentent les mêmes résultats. Les températures affichent une hausse particulièrement marquée de plus de 1.5°C depuis 1987. Les cumuls des précipitations varient sur deux périodes. La première tendance de 1950 à 1978 montre des variations des cumuls assez homogènes. La deuxième tendance de 1979 à 2011 affiche une décroissance significative des précipitations. Il est à noter que les années 80 sont particulièrement excédentaires alors que depuis 2003 les déficits sont importants.

L'étude des débits a été effectuée sur trois sites ayant des contributions d'alimentation en eau différents : le Cheran, la source du Groin et le système karstique de Bange - l'Eau Morte. L'analyse des débits montre que les trois sites ont les mêmes comportements sur deux périodes. De 1960 à 1980, il n'existe pas vraiment d'évolution, il y a une bonne répartition entre les années excédentaires et déficitaires. Après 1980, nous observons une baisse des débits. Ces observations corroborent celles obtenues pour les précipitations avec un léger décalage d'un ou deux ans. Les systèmes karstiques peuvent être considérés comme des milieux très transmissifs pouvant tamponner leur réserve sur un ou deux ans. Les événements "extrêmes" présentent une baisse de fréquence sur la période 1960 - 2011. La fréquence des crues au cours d'une année est en baisse pour le Cheran et la source du Groin mais est en augmentation pour le système karstique de Bange - l'Eau Morte. La durée des périodes d'étiage n'est pas significative sur les 51 ans d'études, bien que sur une courte période (1980-2002) des tendances à la hausse sont observées. Enfin, en accord avec les observations

actuelles [IPCC 2007], la période de fusion nivale est beaucoup plus précoce. Elle présente une avancée d'environ 1 mois depuis 1960 et s'accroît depuis 1985.

L'étude de l'évapotranspiration à partir des données de la station météorologique de Lescheraines (1950 - 2011) a permis de montrer une augmentation significative (de 480 à 540 mm environ) en lien avec la hausse des températures. En effet, le facteur clé de l'évapotranspiration et donc du déficit d'écoulement (formule de Turc) est la température. A partir de ces déficits, nous avons pu calculer les pluies efficaces au sein des bassins d'alimentation du Chéran et de les comparer avec les débits mesurés. La bonne corrélation entre les débits mesurés et les débits estimés, nous a permis d'envisager les débits futurs à partir des données du GIEC 2007. En prenant le scénario le plus alarmiste (A2), nous avons déterminé les déficits des débits des trois sites pour les années 2030, 2050 et 2080. En moyenne pour les sites du Chéran, de la source du Groin et de Bange - L'Eau Morte, les débits diminueront de 18% en 2030, de 30% en 2050 et de 46% en 2080.

Bilan

La gestion et la protection de la ressource en eau des systèmes karstiques est un enjeu important dans les domaines subalpins. Ce travail de thèse montre la complexité d'identifier et de prévoir les impacts liés à l'anthropisme ou au climat lui-même. Dans le cas où le bassin d'alimentation d'un système karstique présente dans l'ensemble un faible degré de vulnérabilité, les activités anthropiques n'occasionneront que peu de problème (or pollution accidentelle très importante). Le risque principal viendra de l'impact lié au changement climatique car le système karstique restitue dans le temps les pluies efficaces. Le système karstique, par sa fonction transmissive, transfère les eaux de pluie infiltrées à son ou ses exutoires et par sa fonction capacitive peut réguler le transfert d'eau sur le temps. Au final, si les précipitations sont légèrement en baisse et que les températures augmentent alors l'évapotranspiration de la végétation sera beaucoup plus importante, entraînant une baisse des pluies efficaces et donc une quantité d'eau disponible diminuée.

Dans le cas où le bassin d'alimentation présente de forts degrés de vulnérabilité, les activités anthropiques devront être plus restreintes. De plus, la fusion nivale étant plus précoce, les activités sylvicoles pourront débuter plus tôt elles aussi. Dans ces conditions, la qualité de l'eau, déjà en baisse quantitativement, serait dégradée et nécessiterait des traitements lourds et par conséquent le coût de l'eau potable deviendrait plus important. Si l'on ajoute, le manque de réserve en eau lié au changement climatique, ce type de système karstique deviendrait inexploitable.

Ce travail de thèse devrait permettre aux gestionnaires forestiers et de l'eau de mieux appréhender leurs ressources. Afin d'éviter tous problèmes, des études sur la vulnérabilité du bassin d'alimentation et du fonctionnement du système karstique seraient nécessaires. Toutefois, ceci demanderait de lourds investissements pour l'équipement des sources karstiques dans le cas où les caractéristiques du site permettrait une installation d'équipements.

Perspectives scientifiques

Afin de continuer les investigations et de valider les conclusions de cette thèse, il serait nécessaire de réaliser les points suivants :

- adapter le fluorimètre de terrain dans le but de suivre en continu les matières organiques du type protéique et des types issus de la production bactérienne afin de mieux comprendre les écoulements et les venues de ces matières au sein du karst lors de travaux de sylviculture ;
- identifier les interactions entre la matière organique fluorescente et certains polluants afin de simplifier le suivi lors d'une pollution ;
- étudier la matière organique fluorescente sur d'autre site, en dehors des moyennes montagnes (karsts présentant moins de végétation sur le bassin d'alimentation), afin de comparer les résultats. Cette étude pourrait également se réaliser dans des milieux autres que des systèmes fracturés stricts comme des milieux mélangeant fractures et porosité ;
- compléter le protocole défini par la réalisation d'analyses à la chromatographie d'exclusion stérique dans le but de caractériser le changement de nature des matières organiques fluorescentes au cours du cycle hydrologique ;
- travailler sur le reste des données de Bange - l'Eau Morte de 2002 à l'actuel ;
- pouvoir quantifier les effets du changement climatique sur la qualité des ressources à l'aide d'autres suivis (turbidité, température, conductivité). A ce sujet, Chambéry métropole réaménage tous ces captages dans le but de créer, à long terme, une base de données de ces différents paramètres.

Bibliographie

- Aiken G. *Humic substances in soil, sediment, and water : geochemistry, isolation, and characterization*. Wiley, New York, 1985.
- Albinet M et Margat J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. *Bull. BRGM*, 2e série, section III, 4 : 3–22, 1970.
- Aller L, Lehr J, Petty R, et Bennett T. Drastic : a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic setting. *Geological Society of India, Bangalore*, 29(1) : 23–37, 1987.
- Andreux F et Munier-Lamy C. *Génèse et propriétés des substances humiques*, volume 2. M. Bonneau et B. Souchier eds., Paris, 1994.
- Arcan L. Etude spectrophotométrique en infrarouge du comportement des sols argileux humectés. *Eau dans la zone non saturée IASH/AIHS*, 1(82) : 336–344, 1968.
- ATDM3D . *Etude préliminaire des aquifères patrimoniaux karstiques. Département de l'Ain. Ensemble " HAUT-BUGEY "*. 1994.
- Aunay B et Le Strat P. *Introduction à la géologie du karst des Corbières*. Rapport BRGM/RP-51595-FR, 2002.
- Bakalowicz M. Géochimie des eaux karstiques. Une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. *AAPG Bulletin*, 21 : 49–58, 1976.
- Bakalowicz M. La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude, structure et fonctionnement. *Hydrogéologie*, 4 : 3–21, 1995.
- Baker A et Lamont-Black J. Fluorescence of dissolved organic matter as a natural tracer of ground water. *Ground Water*, 39(5) : 745–750, 2001.
- Baudoin F. *Hydrogéologie de l'avant-pays de Chartreuse (Isère) hydrodynamique karstique et alluviale*. Thèse de 3e cycle, Université de Joseph Fourier, 1984.
- Bergeret P. *Infiltrations et circulations des eaux en milieu calcaire hydrogéologie du secteur Nord occidental du Massif de la Chartreuse (Savoie, France)*. Thèse de doctorat, Université de Joseph Fourier (Grenoble), Grenoble, 1981.
- Blavoux B et Mudry J. Influence des pluies estivales sur la qualité des réserves de l'aquifère karstique : rôle du sol et de l'épikarst dans la concentration des chlorures. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2(4) : 667–674, 1986.

Blondel T. *Traçage spatial et temporel des eaux souterraines dans les hydrosystèmes karstiques par les matières organiques dissoutes : expérimentation et application sur les sites du Laboratoire Souterrain à Bas Bruit (LSBB) de Rustrel – Pays d’Apt et de Fontaine de Vaucluse*. Thèse de doctorat, Environnement Méditerranéen et Modélisation Agro-Hydrosystèmes, Avignon, 2008.

Boissier J. *Guide d’interprétation des habitats naturels du massif des Bauges*. Conservatoire botanique National Alpin, 2005.

Box G et Jenkins G. *Time series analysis : Forecasting and control*, San Francisco : Holden-Day. BRGM, 1970.

Bozonat J. *Infiltration et circulation des eaux dans les calcaires fissurés hydrogéologie et bilan hydrique du secteur septentrional du massif me La Chartreuse*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1980.

Bro R. PARAFAC. tutorial and applications. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 38(2) : 149–171, 1997.

Bro R et Kiers H. A new efficient method for determining the number of components in PARAFAC models. *Journal of Chemometrics*, 17(5) : 274–286, 2003.

Bèze C. *Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques ; établissement du modèle BEMER, son application à quatre systèmes karstiques du Midi de la France*. PhD thesis, Mém. du Centre d’études et de recherches géol. et hydrogéol. (C.E.R.G.H.), 1976.

Calvet R. *Le sol : propriétés et fonctions*. France Agricole Editions, 2003.

Carfantan. J. *Rapport hydrogéologique sur le forage Ariana. Thermes de Marlioz (Aix-les-Bains)*. 1994.

Carlsson A et Waldeck B. A fluorimetric method for the determination of dopamine (3-hydroxytyramine.). *Acta Physiologica Scandinavica*, 44(3-4) : 293–298, 1958.

Castany G. *Traité pratique des eaux souterraines*. page 661, 1967.

Catalogne C et Routin G. *Caractéristiques morphologiques et fonctionnement hydrologique du système karstique des Echelles*. Mémoire de Licence de Sciences et Technologies Mention Sciences de la Terre et Environnement, 2006.

Champagnac J, Sue C, Delacou B, Tricart P, Allanic C, et Burkhard M. Miocene lateral extrusion in the inner western Alps revealed by dynamic fault analysis. *Tectonics*, 25 : 26, 2006.

Charlier J, Bertrand C, Binet S, Mudry J, et Bouillier N. Use of continuous measurements of dissolved organic matter fluorescence in groundwater to characterize fast infiltration through an unstable fractured hillslope (Valabres rockfall, french alps). *Hydrogeology Journal*, 18(8) : 1963–1969, 2010.

Chen J, Gu B, LeBoeuf E, Pan H, et Dai S. Spectroscopic characterization of the structural et functional properties of natural organic matter fractions. *Chemosphere*, 48(1) : 59–68, 2002.

- Chen J, LeBoeuf E, Dai S, et Gu B. Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions. *Chemosphere*, 50(5) : 639–647, 2003.
- Chen W, Westerhoff P, Leenheer J, et Booksh K. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 37(24) : 5701–5710, 2003.
- Chen Y, Senesi N, et Schnitzer M. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios¹. *Soil Science Society of America Journal*, 41(2) : 352–358, 1976.
- CIPRA . *La gestion de l'eau face au changement climatique*. CIPRA international, 2007.
- Citeau L. *Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires des sols contaminés : relation entre nature des colloïdes et réactivité vis à vis des métaux (Zn, Cd, Cu, Pb)*. Thèse de l'institut national d'agronomie Paris Grignon, 2004.
- Clair T et Ehrman J. Variations in discharge and dissolved organic carbon and nitrogen export from terrestrial basins with changes in climate : A neural network approach. *Limnology and Oceanography*, 41(5) : 921–927, 1996.
- Coble P. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Marine Chemistry*, 51(4) : 325–346, 1996.
- Condon E. A theory of intensity distribution in band systems (meeting abstract). *Physical Review*, 27 : 640, 1926.
- Coolidge A, James H, et Present R. A study of the franck-condon principle. *Chemical Physics*, 4 : 193–211, 1936.
- Cory RM et McKnight DM. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 39(21) : 8142–8149, 2005.
- Cucchi F, Potleca M, et Zini L. Origin and development of cave system in the rosandra valley (classical karst-italy). *Acta Karstologica*, 27(2), 1998.
- Cumberland S et Baker A. The freshwater dissolved organic matter fluorescence–total organic carbon relationship. *Hydrological Processes*, 21(16) : 2093–2099, 2007.
- Debelmas J. *Géologie De La France*, volume 2. Doin, Paris, 1974.
- Döerfliger N. *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)*. Thesis doctorat, University of Neuchâtel, Neuchâtel, 1996.
- Döerfliger N, D. J, et S. L. *Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche Comté*. BRGM/RP-53576-FR, 2004.
- Döerfliger N et Plagnes V. *Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide Méthodologique de la méthode PaPRIKa*. BRGM/RP-57527-FR, 2009.

Desprats J, Marchal J, Pomarès E, et Dorflinger N. *Voirie départementale et protection de la ressource en eau*. BRGM//Conseil Général Hérault, 1998.

Dinel H, Schnitzer M, et Mehuys G. Soil lipids : origin, nature, content, decomposition, and effect on soil physical properties. *Soil Biochemistry*, 6 : 397–429, 1990.

Dorioz J, Trévisan D, Texier S, Prigent-Combaret C, Goudron M, Jocteur-Monrozier L, Moennne-Loccoz Y, Faivre P, Quetin P, et Poulenard J. *Pratiques pastorales et qualité microbiologique des eaux : rôle des facteurs édaphiques et hydrométéorologiques dans la survie et le transfert à l'échelle bassin versant, de populations de bactéries fécales bovines*. GESSOL 2, MEDDAT, Paris, 2008.

Dubach P, Mehta N, Jakab T, Martin F, et Roulet N. Chemical investigations on soil humic substances. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10-11) : 1567–1578, 1964.

Emblanch C, Blavoux B, Puig J, et Couren M. Le marquage de la zone non saturée du karst à l'aide du carbone 13. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 326(5) : 327–332, 1998.

Emblanch C, Garry B, Blondel T, Marc V, et Andreo B. Karst aquifers : a high diversity but also a same identity. *Karst, cambio climatico y aguas subterranas, Malaga*, pages 365–368, 2006.

Ferrari G, Dowell M, Grossi S, et Targa C. Relationship between the optical properties of chromophoric dissolved organic matter and total concentration of dissolved organic carbon in the southern baltic sea region. *Marine Chemistry*, 55(3–4) : 299–316, 1996.

Ford M, Duchêne S, Gasquet D, et Vanderhaeghe O. Two-phase orogenesis convergence in the external and internal sw alps. *J. Geol. Soc. London*, 163 : 815 – 826, 2006.

Franck J. Elementary processes of photochemical reactions. *Transactions of the Faraday Society*, 21 : 536–542, 1926.

Frei C, Schöll R, Fukutome S, Schmidli J, et Vidale PL. Future change of precipitation extremes in Europe : Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 111 : 6105, 2006.

Gallino S. *Hydrogéologie, géochimie et modélisation hydrodynamique-thermique d'un système thermo-minéral associé à un contact structural alpin (Aix-les-Bains - Savoie)*. Thèse doctorat, Université de Savoie, 2007.

Geze B. Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie. *Ann. Spéléol.*, 28(1) : 1–20, 1973.

Gidon M. Les décrochements et leur place dans la structuration du massif de la Chartreuse (Alpes occidentales françaises). *Géologie alpine*, 66 : 39–55, 1990.

- Gidon M. Quelques aspects des rapports entre l'histoire tectonique et la morphogénèse dans le massif de la Chartreuse. *Géologie alpine*, 70 : 13–27, 1995.
- Gidon M. Une faille d'extension antérieure au plissement, sur le rebord oriental du Vercors. *Géologie alpine*, 71 : 193–198, 1996.
- Gidon M. Vues nouvelles sur la structure des massifs des Bornes et des Bauges orientales. *Géologie alpine*, 72 : 35–59, 1997.
- Gidon M. Tectoniques superposées dans le synclinal des Aillons et ses abords (massif des Bauges, Savoie, France). *Géologie alpine*, 75 : 91–102, 1999.
- Gidon M. Les massifs cristallins externes des Alpes occidentales françaises sont-ils charriés ? *Géologie alpine*, 77 : 23–38, 2001.
- Gidon M et Barfety J. Carte géologique détaillée de la France, Montmélian. Technical Report, BRGM, Orléans, 1969.
- Gidon P, Perrier R, Doudoux B, et Nicklès M. Carte géologique détaillée de la France. Chambéry. Technical Report, Service de la carte géologique de la France, Paris, 1963.
- Gogu R et Dassargue A. A short review on groundwater vulnerability assessment. basic statements for use in the framework of the cost 620 action. *Workshop, 18-22 mai, Université Neuchatel, Suisse*, pages 1–19, 1998.
- Goldscheider N, Klute M, Sturm S, et Hötzl H. The pi method – a gis-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Z Angew Geol Hannover*, 46(3) : 157–166, 2000.
- Grasso D. *Interprétation des réponses hydrauliques et chimiques des sources karstiques : (essai d'inférence de la structure des systèmes karstiques)*. Thèse de doctorat, Neuchâtel, Neuchâtel, 1999.
- Griffith S et Schnitzer M. The isolation and characterization of stable Metal-Organic complexes from tropical volcanic soils. *Soil Science*, 120(2) : 126–131, 1975.
- Guide Alpeau . *Guide Alpeau dans l'Arc Alpin et jurassien. Protection des eaux souterraines en forêt*. 2012.
- Gunn J. Point recharge of limestone aquifers - a model from new zealand karst. *Journal of Hydrology*, 61 : 19–29, 1983.
- Guyard N. *Étude du transfert de la matière organique dissoute (MOD) au sein d'un système sol/karst ; application au creux des Élaphe (massif des Bauges) par suivi physicochimique des eaux d'infiltration*. Mémoire Master 2, 2009.
- Guyot J. Le karst superficiel, étude des écoulements hypodermiques sur un site expérimental corconne (gard). *Karstologia*, (6) : 15–20, 1985.
- Harshman R. *Foundations of the PARAFAC procedure : Models and conditions for an " explanatory " multimodal factor analysis*, volume 16. UCLA working papers in phonetics edition, 1970.

Hayes M et Clapp C. Humic substances : Considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*, 166(11) : 723–737, 2001.

Hobléa F. *Contribution à la connaissance et à la gestion environnementale des géosystèmes karstiques montagnards : études savoyardes*. Thèse de doctorat, Université Lyon 2, 1999.

Hobléa F et Philippe M. Le Creux des Elaphes et sa faune de vertébrés holocènes (Commune des Déserts, Plateau du Revard, Parc naturel régional du Massif des Bauges, Savoie) - le contexte karstologique. *Cahiers scientifiques du Muséum d'histoire naturelle de Lyon*, 1 : 87, 2001.

Hudson N, Baker A, Ward D, Reynolds D, Brunsdon C, Carliell-Marquet C, et Browning S. Can fluorescence spectrometry be used as a surrogate for the biochemical oxygen demand (BOD) test in water quality assessment ? an example from south west england. *Science of The Total Environment*, 391(1) : 149–158, 2008.

IPCC . *The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

Jeannin P. La problématique du karst lors du creusement d'un tunnel. *Bull. angew. Geol.*, 12(2) : 27–38, 2007.

Jenkins GM et Watts DG. *Spectral analysis*. Holden-Day, San Francisco, 1968.

Khan S et Schnitzer M. The retention of hydrophobic organic compounds by humic acid. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36(7) : 745–754, 1972.

Kiraly L, Perrochet P, et Rossier Y. Effect of the epikarst on the hydrograph of karst springs : a numerical approach. *Bulletin Hydrogéol.*, 14 : 199–220, 1995.

Lamiriaux C. *Géologie du Miocène des chainons jurassiens méridionaux et du Bas-Dauphiné nord oriental entre Chambéry et La Tour du Pin : (étude stratigraphique, sédimentologique et tectonique) - Alpes françaises*. These, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1977.

Lastennet R, Puig J, Emblanch C, et Blavoux B. Influence de la zone non saturée sur le fonctionnement des systèmes karstiques. mise en évidence dans les sources du Nord-Vaucluse. *Hydrogéologie*, 4 : 57–66, 1995.

Lecuret C, Barret P, et Bignon F. *Contrat de rivière du Chéran, étude "bilan - évaluation - perspectives"*. Syndicat Mixte Interdépartemental d'Aménagement du Chéran. Départements de Savoie et Haute-Savoie, 2010.

Leenheer J et Croué J. Characterizing aquatic dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 37(1) : 18A–26A, 2003.

Lefrançois J, Grimaldi C, Gascuel-Odoux C, et Gilliet N. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. *Hydrological Processes*, 21(21) : 2923–2933, 2007.

- Lemordant Y. *Infiltration et transfert des eaux souterraines en pays karstique le Plateau Du Mont Revard (Savoie)*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1977.
- Lepiller M. *Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires étude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France)*. Thèse de 3e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1980.
- Leyland R et Witthüser K. Vuka : a modified cop vulnerability mapping method for karst terrains in south africa. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(1) : 107–116, 2010.
- Liu C, Bennett D, Kastenber W, McKone T, et D. B. A multimedia, multiple pathway exposure assessment of atrazine : fate, transport and uncertainty analysis. *Reliability Engineering & amp ; System Safety*, 63(2) : 169 – 184, 1999.
- Livre Blanc du climat en Savoie . *Le Livre Blanc du climat en Savoie*. Mission Développement Prospective - MDP, Conseil général de la Savoie, 2010.
- Lopez M et Delannoy J. *Le système karstique des Echelles : ses caractéristiques morphologiques et hypothèses d'évolution*. 2002.
- Lord Rayleigh J. *The Theory of Sound*, volume 1. MacMillan and Company Ltd., London, 1894.
- Luciani X, Mounier S, Paraquetti H, Redon R, Lucas Y, Bois A, Lacerda L, Raynaud M, et Ripert M. Tracing of dissolved organic matter from the SEPETIBA bay (Brazil) by PARAFAC analysis of total luminescence matrices. *Marine Environmental Research*, 65(2) : 148–157, 2008.
- Maglione G et Carn M. Spectres infrarouges des minéraux salins et des silicates néoformés dans le bassin tchadien. *Cahiers ORSTOM.Série Géologie*, 7(1) : 3–9, 1975.
- Mahler B, Personné J, Lods G, et Drogue C. Transport of free and particulate-associated bacteria in karst. *Journal of Hydrology*, 238(3–4) : 179 – 193, 2000.
- Mangin A. Notion de systèmes karstiques. *Spelunca Mém* 8, pages 65–68, 1974.
- Mangin A. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse de 3e cycle, Laboratoire souterrain du C.N.R.S, Moulis, 1975.
- Mangin A. Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Ann. Spéléol.*, 25 : 581–610, 1979.
- Mangin A. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1-4) : 25–43, 1984.
- Marchand T. *La Chartreuse méridionale : étude des grands réseaux karstiques, recherches hydrogéologiques et géomorphologiques*. Thèse de 3e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1985.

Margat J. *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Base de la cartographie*. Rapport BRGM, 68 SGL 198 HYD., 1968.

Marsaud B. *Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Paris, 1997.

Mathevet T, Lepiller ML, et Mangin A. Application of time-series analyses to the hydrological functioning of an alpine karstic system : the case of Bange-L'Eau-Morte. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6) : 1051–1064, 2004.

McKnight D, Boyer E, Westerhoff P, Doran P, Kulbe T, et Andersen D. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnology and Oceanography*, 46(1) : 38–48, 2001.

McMahon S, Williams M, Bottomley P, et Myrold D. Dynamics of microbial communities during decomposition of carbon-13 labeled ryegrass fractions in soil. *SOIL science Society of America Journal*, 69 : 1238–1247, 2005.

Mobed J, Hemmingsen S, Autry J, et McGown L. Fluorescence characterization of ihss humic substances : Total luminescence spectra with absorbance correction. *Environmental Science & Technology*, 30(10) : 3061–3065, 1996.

Mujito S. *Les Sédiments Tertiaires dans le Jura méridional et les Bauges occidentales Savoie, Haute Savoie (France)*. Thèse de 3e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1981.

Murphy K, Stedmon C, Waite T, et Ruiz G. Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 108(1-2) : 40–58, 2008.

Najib Molai H. *Etude de la structure et du fonctionnement hydrologique du bassin versant karstique de la Doria (Massif des Bauges-Savoie)*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2000.

Ndira V. *Substances humiques du sol et du compost. Analyse élémentaire et groupements atomiques fictifs : vers une approche thermodynamique*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 2006.

Nicoud G. *Hydrogéologie de la Haute Vallée du Chéran, Massif des Bauges (Savoie)*. Thèse de 3e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1973.

OFEV . *Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. Hydrologie - régime d'écoulement*. Office Fédéral de l'Environnement, 2007.

ONERC . *Changement climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels*. Rapport Technique N1 de l'ONERC, 2008.

Palmer A. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103(1) : 1–21, 1991.

Pardé M. L'abondance des cours d'eau. *Revue de géographie alpine*, 21(3) : 497–542, 1933.

- Parlanti E, Wörz K, Geoffroy L, et Lamotte M. Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs. *Organic Geochemistry*, 31(12) : 1765–1781, 2000.
- Pasto D et Johnson C. Laboratory text for organic chemistry : a source book of chemical and physical techniques. 1979.
- Peletier-Giraud E, Döerfliger N, et Crochet P. Évaluation multicritère de la vulnérabilité des aquifères karstiques en région méditerranéenne à l'aide de la méthode risque (karst nord montpelliérain) = multicriterion assessment of the vulnerability of karstic aquifers in mediterranean area using the risque method (karst in the north part of montpellier). *Sciences et techniques de l'environnement. Mémoire hors-série*, (13) : 281–284, 2001.
- Peuravuori J et Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances. *Analytica Chimica Acta*, 337(2) : 133–149, 1997.
- Peyraude N. *Apports des équilibres calco-carboniques et du carbone 13 pour l'étude de l'air et des écoulements d'eau dans la zone non saturée du karst : application au système karstique perché de la grotte de Cussac (Dordogne, France)*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 2011.
- Piccolo A. The supramolecular structure of humic substances. *Soil Science*, 166(11) : 810–832, 2001.
- piccolo A, Nardi S, et Concheri G. Macromolecular changes of soil humic substances induced by interactions with organic acids. *Eur. J. Soil Sci.*, 47 : 319–328, 1996.
- Pranville J, Plagnes V, Rejiba F, et Tremoulet J. *Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie sud du Causse de Gramat*. PhD thesis, Mémoire master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie. Parcours Hydrologie Hydrogéologie (Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris et École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts), 2007.
- Pronk M, Goldscheider N, et Zopfi J. Particle-Size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs. *Environmental Science & Technology*, 41(24) : 8400–8405, 2007.
- Quinlan J, Smart P, Schindel G, Alexander E, Edwards A, et Smith A. Recommended administrative regulatory definition of karst aquifers, principles for classification of carbonate aquifers and practical evaluation of vulnerability of karst aquifers. *Proceedings of the 3rd Conf. on Hydrogeology, Geology and Management of Groundwater in Karst Terrains*, pages 753–635, 1991.
- Raman C et Krishnan K. A new type of secondary radiation. *Nature*, 121(3048) : 501, 1928.
- Rampnoux J. Rapport géologique sur la définition des périmètres de protection du captage de la roche Saint-Alban, 11 p. 1998.

Rampnoux J, Nicoud G, et Pallet I. Traçage au relai du mont du chat. DDAF savoie, 35 p. 1985.

Rhône-Méditerranée-Corse B. *Guide technique n3 : Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques*. SDAGE RMC, 1999.

Salomon J. *Précis de karstologie*. Presses Universitaire de Bordeaux, 2006.

Santos Narvaez J. *Contribution à l'étude géologique des chainons externes nord-occidentaux du massif de Chartreuse - Savoie - Alpes françaises*. These, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1980.

Sarkkola S, Koivusalo H, Laurén A, Kortelainen P, Mattsson T, Palviainen M, Piirainen S, Starr M, et Finér L. Trends in hydrometeorological conditions and stream water organic carbon in boreal forested catchments. *Science of The Total Environment*, 408(1) : 92–101, 2009.

Savoy L. *Use of natural and artificial reactive tracers to investigate the transfer of solutes in karst systems*. PhD thesis, University of Neuchatel, 2007.

Schnegg P. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. *Groundwater and Human Development*, pages 1484–1488, 2002.

Schnitzer M. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. volume Volume 68. Academic Press, 1999.

Schnitzer M et Neyroud J. Alkanes and fatty acids in humic substances. *Fuel*, 54(1) : 17–19, 1975.

Sierra M, Giovanela M, Parlanti E, et Soriano-Sierra E. Fluorescence fingerprint of fulvic and humic acids from varied origins as viewed by single-scan and excitation/emission matrix techniques. *Chemosphere*, 58(6) : 715–733, 2005.

Silverstein R, Bassler G, et Morrill T. *Infrared spectroscopy. In Spectrometric identification of organic compounds*. 5th ed. New York : John Wiley and Sons, Inc., 1991.

Sinreich M, Kozet R, et Mudry J. Conceptual model for specific vulnerability assessment. in : Zwahlen f, editor. vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers,eur 20912. brussels : European commission, directorate-general xii science, research and development. pages 64–70, 2004.

Skoog D, West D, Holler J, et Buess-Herman C. *Chimie analytique*. De boeck, 1997.

Soulios G. Contribution à l'étude des courbes de récession des sources karstiques : Exemples du pays hellénique. *Journal of Hydrology*, 124 : 29–42, 1991.

Spencer R, Pellerin B, Bergamaschi B, Downing B, Kraus T, Smart D, Dahlgren R, et Hernes P. Diurnal variability in riverine dissolved organic matter composition determined by in situ optical measurement in the san joaquin river (California, USA). *Hydrological Processes*, 21(23) : 3181–3189, 2007.

- Stedmon C, Markager S, et Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 82(3-4) : 239–254, 2003.
- Stedmon CA et Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis : a tutorial. *Limnology and Oceanography : Methods*, 6(1) : 1–6, 2008.
- Stevenson FJ. *Humus chemistry, genesis, composition, reactions*. John Wiley et Sons, 1982.
- Stevenson FJ. *Humus chemistry : genesis, composition, reactions*. John Wiley and Sons, 1994.
- Suais M, Vinatier J, et Barat A. *Vulnérabilité des aquifères, recherche de critères cartographiques pertinents. Essai de cartographie automatique sur la plaine alluviale entre Rhône et Ain (01)*. R 30890 RHA 4S 90, BRGM, 1990.
- Sutton R et Sposito G. Molecular structure in soil humic substances : The new view. *Environmental Science et Technology*, 39(23) : 9009–9015, 2005.
- Swaby R et Ladd J. Chemical nature, microbial resistance and origin of soil humus. In *Transactions of the Joint Meeting of Commission IV and V*, pages 197–202, New Zealand, 1962.
- Talour B. *Hydrogéologie karstique du massif du Grand Som (Chartreuse, Isère)*. Thèse de 3e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1976.
- Tayebi A, Jaillet S, Gasquet D, et Bouabdellah M. Analyse temporelle de la vulnérabilité des ressources en eaux karstiques d'une moyenne montagne méditerranéenne : Beni Snassen (Maroc oriental). *9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon : France*, pages 463–466, 2011.
- Tissier G, Blondel T, Dzikowski M, Hobléa F, et Perrette Y. Méthodologie pour l'identification et la caractérisation de la matière organique dans les eaux souterraines. *9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon : France*, pages 471–473, 2011a.
- Tissier G, Blondel T, Dzikowski M, Hobléa F, et Perrette Y. Suivi en continu de la matière organique fluorescente aux émergences karstiques. *9th Conference on Limestone Hydrogeology, Besançon : France*, pages 467–470, 2011b.
- Traina SJ, Novak J, et Smeck NE. An ultraviolet absorbance method of estimating the percent aromatic carbon content of humic acids. *Journal of environmental quality*, 19(1) : 151–153, 1990.
- Trčák B. How can the epikarst zone influence the karst aquifer hydraulic behaviour? *Environmental Geology*, 51 : 761–765, 2007.
- Turc L. Evaporation et écoulement en cases lysimétriques au champ et dans les bassins de cours d'eau. *U.G.G.I, A.I.H.S*, 49 : 75–83, 1959.

Valdes D, Dupont J, Massei N, Laignel B, et Rodet J. Analysis of karst hydrodynamics through comparison of dissolved and suspended solids' transport. *Comptes rendus-Géoscience*, 337 : 1365–1374, 2005.

Vías J, Andreo B, Perles M, Carrasco F, Vadillo I, et Jiménez P. *Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers*. Karst and Enviroment (F. Carrasco, J.J. Durán, y B. Andreo, B., Eds.), 2002.

Vernoux J et Buchet R. *Améliorer la protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine*. BRGM, 2010.

Vrba J et Zaporozec A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *IAH*, 1 : 131, 1991.

Williams G. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in river. *Journal of Hydrology*, 111 : 89–106, 1989.

Williams P. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61(1-3) : 45–67, 1983.

Williams P. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology : a review. *International Journal Of Speleology*, 37(1) : 1–10, 2008.

Zamolo G. *Régime des eaux souterraines dans les massifs calcaires hydrogéologie du secteur Sud-Est du Massif des Bauges (Savoie), Bassins versants du Ternèze et du Nant d'Aillon*. Thèse de 3e cycle, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1980.

Zsolnay . Dissolved organic matter : artefacts, definitions, and functions. *Geoderma*, 113(3-4) : 187–209, 2003.

Annexes

Annexe 1

La description ci-dessous présente, en fonction des ages, les différents types de faciès qui caractérisent chaque massif.

Période Jurassique

Oxfordien supérieur - Kimméridgien inférieur

Au sud-est du massif des Bauges, cet étage est représenté par des marnes et des calcaires-marneux bleus en petits bancs plissotés. Il constitue le cœur des anticlinaux jurassiques. Au niveau de la Chartreuse septentrionale, il est composé de calcaires bruns riches en radiolaires à patine fine sur une épaisseur de 200 m. Sur le chaînon du jura, le niveau inférieur correspond à des calcaires marneux gris sombres très plissotés à spicules et cristaux de dolomies.

Kimméridgien moyen

En Chartreuse, l'étage est représenté par des petits bancs calcaires marneux en alternant des lits marneux.

Tithonique (Kimméridgien supérieur – Portlandien)

Dans les Bauges, il est caractérisé par des bancs calcaires lités de couleur beige à pâte micritique de taille métrique. L'ensemble du système avoisine les 150 m et est visible dans la partie ouest du massif. En Chartreuse, le Tithonique est composé essentiellement à la base de bancs calcaires brun-clair de 0,5 à 2 m d'épaisseur, séparés par des interlits marneux décimétriques qui évoluent vers de gros bancs massifs métriques. L'ensemble du faciès correspond à une puissance de 150 m. Dans le massif de l'Epine - Chat, il est constitué de calcaires récifaux dolomitisés de 20 à 30 m d'épaisseur. Le niveau sommital est caractérisé par des bancs de calcaires clairs, de 50 à 150 cm d'épaisseur, riches en Nérinées, Rudistes et fragments coralliens.

Période Crétacé

Berriasien

A l'ouest des Bauges, il se présente sous forme de bancs calcaires appelés de Montagnole (faciès bioclastique plus ou moins grossier), souvent bicolore alternés de marnes de même épaisseur. Au sud-est, il est formé par une puissante série de marno-calcaires fins et de calcaires noirs en bancs décimétriques. Pour la Chartreuse, cet ensemble peut être divisé en trois formations. Le Berriasien inférieur est caractérisé par l'alternance de calcaires argileux et de marnes. Les bancs calcaires sont d'épaisseur variable mais la puissance de l'ensemble est de 200 à 250 m. Le Berriasien

moyen présente des calcaires bicolores de Montagnole. La puissance de l'ensemble est de 50 à 80 m. Le Berriasien supérieur, d'une puissance de 100 m, est composé de calcaires clairs disposés en bancs massifs. Au niveau du chaînon de l'Épine-Chat, le Berriasien passe de calcaires massifs à sa base à des calcaires argileux à son sommet.

Valanginien

Dans le massif des Bauges, le Valanginien inférieur correspond à des marnes d'une puissance moyenne de 120 m rendant totalement imperméable ce niveau. Le Valanginien moyen est composé par des bancs calcaires massifs zoogènes à grain fin et de couleur claire d'une épaisseur d'environ 150 m. Le Valanginien supérieur est caractérisé par des petits bancs calcaires grossiers roux très détritiques séparés par une vire marneuse. Au sommet de ce système, se développe des calcaires roux et bicolores. L'épaisseur de la série est de 150 m. Dans le massif de la Chartreuse, le Valanginien inférieur est caractérisé par des bancs de calcaires roux d'épaisseur pluri centimétrique séparés par des interlits marneux. Le Valanginien supérieur se distingue par des calcaires de Fontanil, leur teinte est plutôt rousse en patine à la surface et bleuté en profondeur ("calcaires bicolores"). Ceci est dû à une teneur notable en fer ferreux s'oxydant sous les actions atmosphériques. Au sommet, on trouve la présence de lentilles de silex. Cet étage peut atteindre les 300 m. Plus à l'est, l'épaisseur de cette formation diminue considérablement. Sur le chaînon jurassien, seul le Valanginien inférieur est présent sous forme de marnes de couleur bleue noire à patine jaune. Ce niveau est estimé à 100 m.

Hauterivien

La limite, dans les Bauges, entre le Valanginien et l'Hauterivien n'est pas très nette et se fait très progressivement. L'Hauterivien inférieur présente des lits marneux bleutés intercalés de bancs calcaires spathiques. L'épaisseur de ce niveau est de 30 m. L'Hauterivien moyen est marqué par des marnes rousses à niveaux glauconieux (10 à 15 m). En Chartreuse, l'Hauterivien correspond à un niveau imperméable par la présence de marnes noires siliceuses avec des petits niveaux de calcaires marneux roux ou gris-bleuté. La puissance de cet étage est de 70 à 150 m. Sur le chaînon de l'Épine-Chat, l'Hauterivien, d'une puissance de 120 m, est composé à la base de marnes bleu foncées, sur une épaisseur de 5 à 10 m, avec localement des calcaires gris clair à grain de glauconie.

Barrémien inférieur

Dans les Bauges, le Barrémien inférieur présente des calcaires jaunes ou bicolores assez grossiers en bancs décimétriques comportant des huîtres, des oursins et des zones à silex. L'épaisseur de ce niveau est de 40 m. Pour le chaînon de l'Épine-Chat, le Barrémien est composé de calcaires roux peu marneux mais riches en silex.

Le complexe Urgonien (Barrémien supérieur - Aptien)

Dans le domaine des Bauges, on retrouve des calcaires blancs massifs à rudistes et Orbitolines ayant une épaisseur de 200 à 250 m. La base est composée de calcaires à Serpules. Elle est surmontée par des calcaires bleutés à bancs plus compacts, suivis d'une couche à Orbitoline, puis par de gros bancs de calcaires blancs. La vire à Orbitolines est très peu présente. Pour la Chartreuse, le complexe Urgonien correspond à

un faciès de calcaires continus blancs cristallins à rudistes et d'épaisseur de 150 à 200 m. Une couche à Orbitolines constituée de calcaires roux et de marnes graveleuses de 15 à 20 m marque la base. L'Aptien inférieur possède les mêmes caractéristiques que les calcaires du Barrémien supérieur avec une puissance de 50 m. L'Aptien supérieur appelé « Lumachelle » (roche sédimentaire contenant des coquilles) correspond à un complexe détritique et possède une puissance de 20 m. Le calcaire y est grossier, spathique et le plus souvent roussâtre. Il n'existe que dans la partie sud-est. Dans le domaine jurassien, l'Urgonien est très massif, indivisible et forme un bloc compact de calcaires gris roussâtre, souvent spathiques ou sableux d'une épaisseur de 100 m.

Albien

Il se présente, dans les Bauges, sous forme de gré dur glauconieux (faciès Gault) à gros grains de quartz et à ciment calcaire. L'épaisseur de cette série est de quelques mètres à l'ouest et peut atteindre les 30 m à l'est. En Chartreuse, l'Albien est caractérisé soit par des grès verts et glauconieux, soit par un béton de fossiles phosphatés et ferrugineux. Il est extrêmement érodé vers l'est.

Période Tertiaire

Eocène

Durant cette période, la région des Bauges était émergée et a subi une forte érosion. Des dépôts continentaux sont visibles sous forme de poches d'argiles rouges, de grès et de sables grossiers colmatant les diaclases urgoniennes.

Oligocène

Appelé aussi le "Nummulitique", il est représenté plus largement, dans le massif des Bauges, par une succession de brèches, de sables continentaux et des couches de marnes bleues (3 m) à écailles de poissons marins (Melettes). Les couches deviennent plus gréseuses et font place aux grès des Déserts ou "Nummulitique gréseux". Dans les massifs jurassiens, les formations sont de type continental discordant. Des conglomérats à ciment marno-calcaire de teinte rouge et à éléments calcaires centimétriques ont été observés. Des marnes rouges peuvent présenter des petits bancs calcaires plus massifs (10 cm d'épaisseur environ).

Miocène

Dans le massif des Bauges, il existe très localement des molasses burdigaliennes. En Chartreuse, le Miocène est caractérisé par des dépôts de molasse marine gréseuse faiblement perméable sur une épaisseur de 90 m. Les molasses se développent sur de grandes épaisseurs à l'ouest des massifs subalpins et au fond de certains synclinaux. Pour le domaine jurassien, le Miocène est caractérisé par des grès à ciment calcaire, gris vert, avec des intercalations de niveaux de marnes.

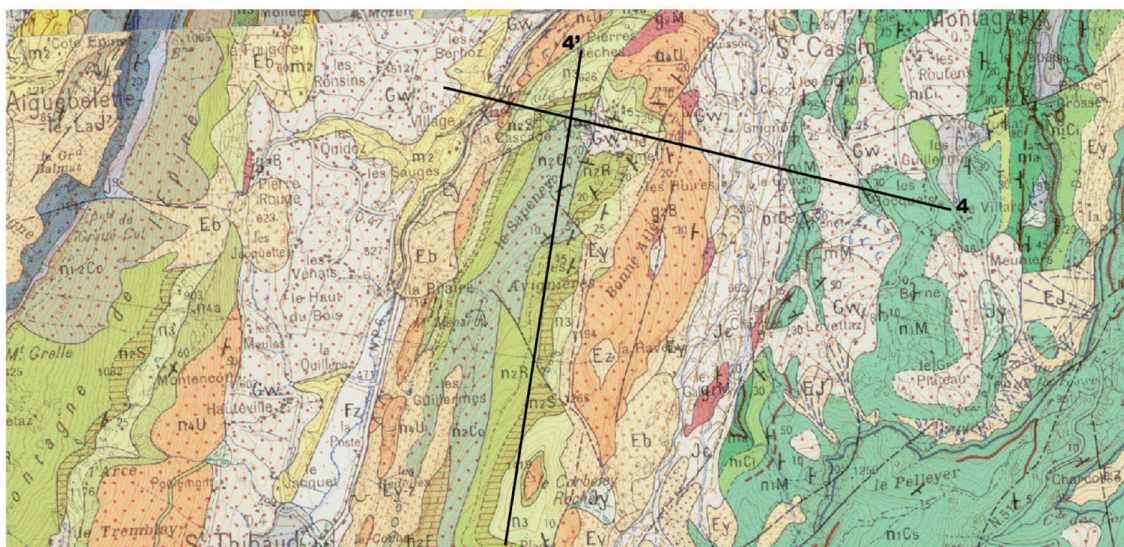
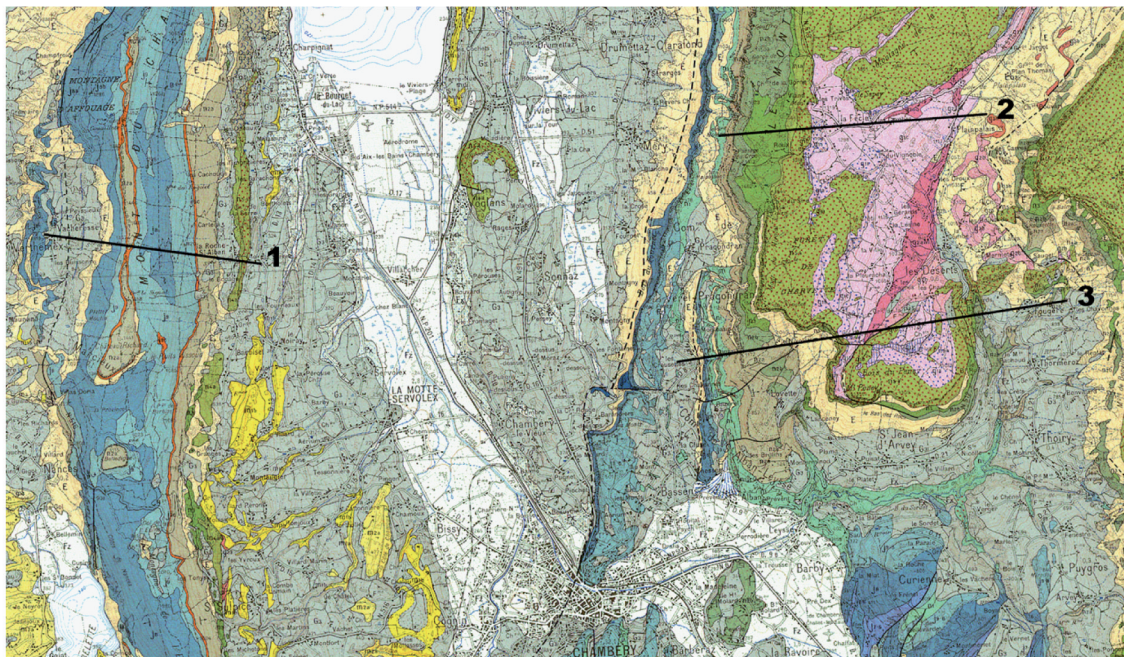
Période Quaternaire

Dans les Bauges, il n'existe que très peu de matériel sur les plateaux ouest (Mont Revard), mais les dépôts sont localisés à la base des falaises valanginiennes ou urgoniennes. Dans le massif de la Chartreuse, les moraines, à éléments mal classés,

sont datées du Würm. Elles sont surtout riches en argile constituant des niveaux imperméables. Elle est représentée sur le chaînon jurassien par des moraines de fond wurmiennes.

Annexe 2

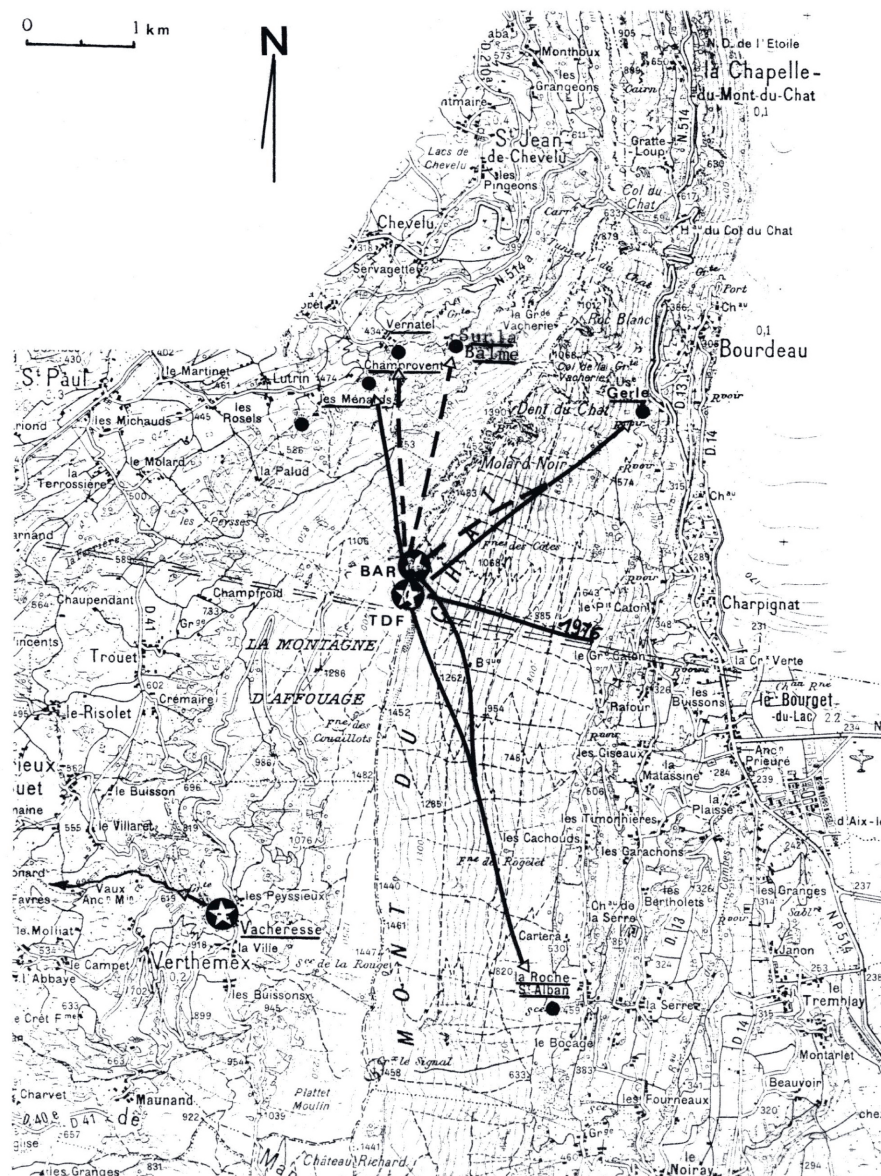
localisation des coupes sur les cartes géologiques au 1/50000

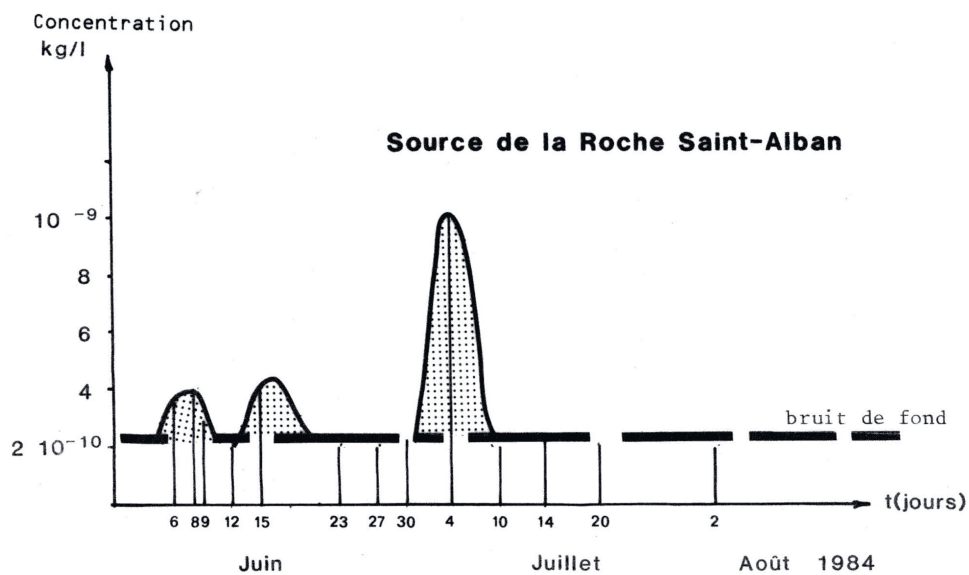
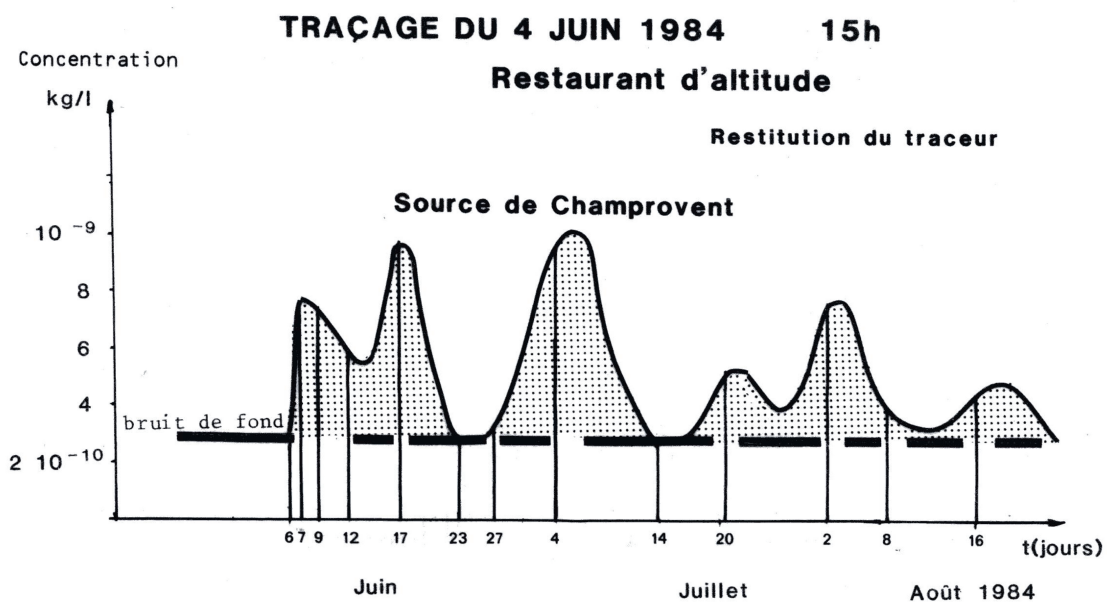


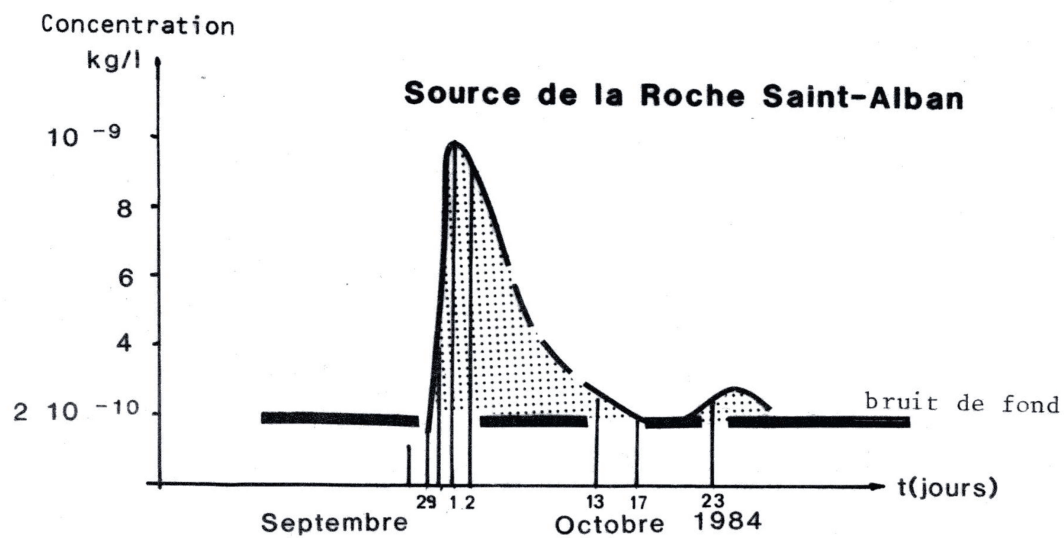
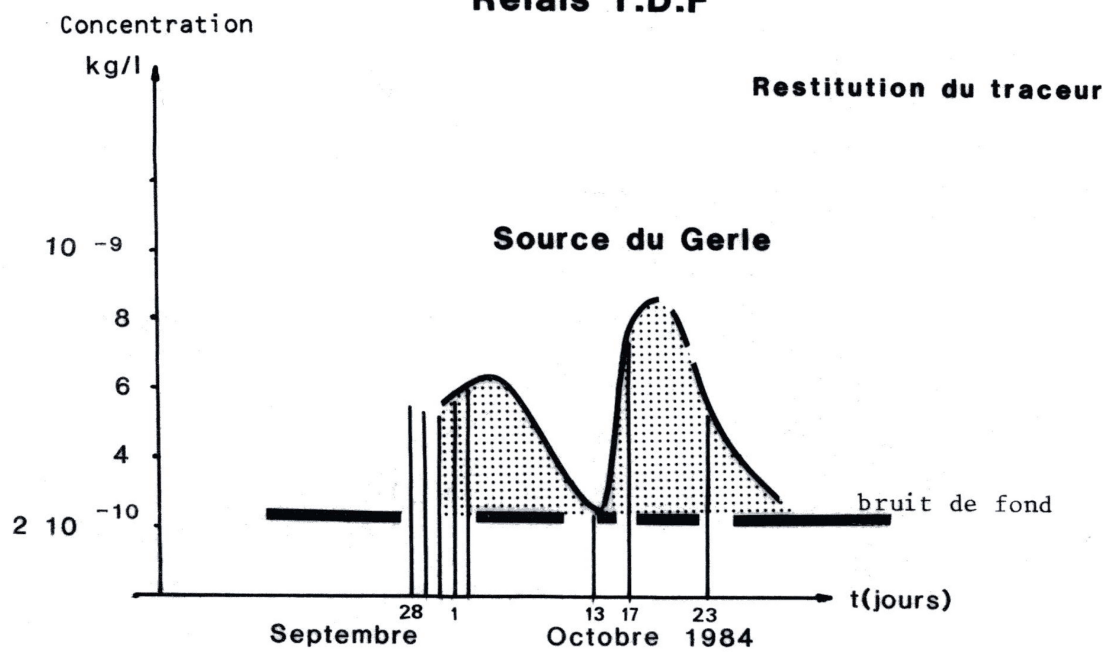
Annexe 3

Traçage sur le chaînon Epine - Dent du Chat [Rampnoux *et al.* 1985]

LES RELATIONS PAR TRACAGE ENTRE POINTS D'INJECTION ET SOURCES





TRAÇAGE DU 28 SEPTEMBRE 1984 14h**Relais T.D.F**

Annexe 4

Fiche technique du fluorimètre de terrain, le GGUN-FL30

Diamètre 160 mm Hauteur 170 mm

Usage : Immersion directe en rivière ou source (0-10 m), ou comme fluorimètre de laboratoire pour mesures rapides d'échantillons. S'utilise aussi bien avec des embouts rapides et des tubes de 6 mm. Jusqu'à 4 sources lumineuses couvrent la totalité du spectre optique. Matériau : acier inoxydable.

La sonde se connecte par un câble de signal à 4 conducteurs à un boîtier étanche contenant un acquisateur de données et 1 à 2 batteries. Le signal est transmis sous forme digitale. Le boîtier peut se connecter à tout PC au moyen de l'interface série. Pour un travail sans surveillance, l'acquisiteur enregistre jusqu'à 4 x 30'000 valeurs et la température de l'eau (précision : 0.1°C) sur sa carte Compact Flash.

Nombre de lampe	4
Echelle de turbidité	0.02 à 400 NTU
Seuil de détection	2×10^{-11} g/ml (0.02 ppb) typique (uranine)
Pas de mesure	5 sec minimum, programmable
Durée d'enregistrement	10 à 20 j (1 ou 2 batteries), jusqu'à qq. sem.
Conversion ADC	24 bits unipolaire
Sortie digitale	sérielle RS232
Alimentation (batterie au Pb)	6 Volt
Capacité de la batterie	12-24 Ah
Consommation en veille	3.5 mA (pour un pas d'échantillonnage de 5 minutes)
Connexions	câble de 15 m étanche (1.6 kg) avec connecteurs
Matériau de la sonde	acier inoxydable (7.3 kg)
Boîtier de batteries	étanche (poids avec 2 batteries : 7.9 kg)
Thermomètre intégré	sensibilité 0.1°C

Annexe 5

Définition des termes sylvicoles

Chablis - Arbre renversé, déraciné ou cassé, le plus souvent par la suite d'un accident climatique (vent, neige).

Coupe d'emprise - Coupe rase sur l'emprise d'une route ou de tout autre équipement.

Coupe de jardinage - Coupe d'arbres devant assurer à la fois la récolte des arbres mûrs, la mise en bonne condition de croissance des autres arbres et la régénération naturelle.

Coupe rase - Coupe de la totalité des arbres d'un peuplement. Elle est suivie d'un renouvellement naturel ou artificiel. L'état boisé est conservé.

Débardage - Opération consistant à déplacer les bois abattus vers un emplacement de stockage ou de chargement par camions. Le débusquage peut constituer une première phase de processus.

Débusquage - Première phase du débardage qui consiste, généralement sur une courte distance, à déplacer les bois depuis leur point de chute vers une voie ou place de vidange.

Futaie - Peuplement forestier composé d'arbres issus de graines.

Futaie irrégulière - Futaie dans laquelle les arbres ont des dimensions et des âges différents.

Futaie régulière - Futaie dans laquelle les arbres ont des dimensions voisines et quasiment du même âge.

Piste forestière - Ouvrage destiné à être utilisé par les engins forestiers pour le débardage.

Taillis - Peuplement forestier composé d'arbres issus de rejets de souche.